

Mais qui étaient ces enfants d'une dizaine d'années en blouses blanches au Centre Jaude pendant la Fête de la Science ?

Ils étaient là pour expliquer avec beaucoup de sérieux et de conviction, panneaux à l'appui, comment l'effet photovoltaïque convertit directement les rayons solaires en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium? Bien sûr une bonne partie du public reconnaissait les Jeunes Pousses de l'ADASTA. Sept thèmes avaient été proposés par notre association pour cette semaine d'octobre (du 11 au 16/10) organisée sur l'initiative du Ministère délégué à la recherche. La réussite de cette fête est, en ce qui nous concerne, le travail des bénévoles qui oeuvrent au sein de l'association à la diffusion de la culture scientifique et technique. Qu'ils soient ici, toutes et tous, chaleureusement remerciés de leur implication déterminée et de leur enthousiasme. En effet au-delà de la simple vulgarisation, la fête de la science est l'occasion pour tous de vivre un moment d'échange et de communication, et aussi de débattre des grandes questions d'actualité avec celles et ceux qui pratiquent la science quotidiennement.

Nous remercions vivement tous les participants aux différentes manifestations au Centre Jaude, Bernard Ragout pour les réalisations ludiques et captivantes de l'éolienne produisant de l'électricité et de l'avion propulsé grâce au panneau solaire, Pierrette Tourreix, Patricia Teyssonnère, Jean-Pierre Garcia, Guy Robert. Suzanne Gély est intervenue au collège Champclaux à Châtel-Guyon et aux écoles primaires de Solignat et d'Antoingt, accompagnée pour ces deux derniers établissements par le Docteur Durando, nutritionniste au Centre Jean Perrin. Jean Chandezon présentait la photo numérique en relief, dans les locaux de l'ADASTA et Michel Naranjo donnait une conférence au CUST sur le thème : "Epistémologie des sciences de l'ingénieur".

Bernard Lauron, Jean Fau, Alain Borghèse, ingénieurs de l'URISA ont réalisé et présenté des documents sur l'effet photovoltaïque et les applications aux panneaux solaires.

Enfin, Guy Kieffer, chercheur retraité du CNRS, présentait une conférence sur le volcanisme : "Le phénomène de la prismation des laves".

La variété des activités de l'ADASTA dans les domaines de la physique, de la biologie, de la chimie, de la géologie, de l'astronomie, etc..., en partenariat avec l'Union des Professeurs de Physique et Chimie, l'Union des Ingénieurs et Scientifiques d'Auvergne, les enseignants du CUST et des Universités et grâce aux spon-

sors, permet d'intéresser un large public. Ainsi l'objectif de diffuser et de promouvoir la culture scientifique et technique dans la région Auvergne est atteint auprès des jeunes mais aussi des adultes. Nous leur proposons de faire de l'expérimentation dans nos locaux, d'assister à des conférences données mensuellement par des spécialistes des sciences, de la santé, de la musique, de l'art, de rencontrer des personnes compétentes dans ces domaines et de faire des visites de laboratoires et d'entreprises.

Bonne lecture à tous de ce nouveau numéro.

Le Président Jean-Claude CAPELANI

# Merci à nos sponsors







ministere delegue recherche et nouvelles technologies









#### Comité de rédaction de la Revue Auvergne-Sciences

Président : Paul Avan

Rédactrice en chef : Jocelyne Allée

Membres : Nathalie Andréoletti, Georges Anton.

Jean-Claude Capelani, Jean Chandezon, Luc Dettwiller, Paul-Louis Hennequin, Michel Naranjo, Robert Tavernier

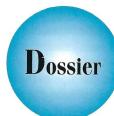
**Photo de couverture :** Orgue de la Cathédrale de Sens (Yonne) - H. Bouffard **Impression :** Imprimerie Porçu - Clermont-Ferrand



L'oreille sourde : du cornet acoustique processeur numérique	
L'orgue	10
Bilan et perspective du développemen de l'énergie éolienne en France en 2003	
L'Institut Français du Pétrole	26
Fabrication et utilisation des "Silicones"	29
Le monde des insectes	32

Voyage à Saint-Léons .....

36





# L'oreille sourde : du cornet acoustique au processeur numérique

# Par Paul AVAN

Laboratoire de Biophysique sensorielle, service de Biophysique, Faculté de médecine, Clermont-Ferrand. Avec la collaboration de Laurent Gilain et Thierry Mom, service d'ORL, CHU de Clermont-Ferrand

Le handicap associé à la surdité est difficilement mieux concrétisé, dans l'esprit du grand public, que par l'exemple de Ludwig van Beethoven. atteint dans sa vie quotidienne mais surtout dans sa créativité par une surdité sans doute progressive et mixte : celle-ci était, pense-t-on, due à des atteintes combinées de l'appareil de transmission des sons de l'air extérieur à l'oreille interne, et de l'appareil de codage situé dans l'organe sensoriel auditif, dans l'oreille interne. Beethoven utilisait des appareils de fortune destinés à amplifier les sons extérieurs, notamment des cornets acoustiques, mais aussi, plus simplement, une tige rigide tenue entre les dents et appuyée contre le cadre de son piano: les vibrations acoustiques parvenaient ainsi mieux à la cochlée. la structure qui renferme l'organe sensoriel auditif, même si le déficit qui atteignait celui-ci ne permettait pas la restauration d'une audition normale. Beethoven confiait dans une lettre à un ami médecin, Franz-Gerhard Wegeler, citoyen de Bonn, le 29 juin 1801 (c'est-à-dire au sommet de sa productivité), "...Depuis presque deux ans, j'évite toute société, car je ne peux pas dire aux gens : "je suis sourd"... et pour cause! sa dignité et sa compétence de compositeur auraient immédiatement été mises en cause (et ceci stupidement, sa surdité de plus en plus totale n'ayant pas empêché la création de ses plus grandes œuvres).

Toute l'histoire de Beethoven en relation avec sa surdité souligne l'ostracisme redouté, car la surdité est associée dans l'esprit de beaucoup de ses contemporains (et cette association durait encore il y a à peine plus de 2 décennies) à un déficit mental, voire intellectuel. Ceci souligne aussi l'importance des aides techniques susceptibles de pallier quelques-uns des inconvénients de la surdité : notamment la perte de sensibilité vis-à-vis des sons de faible niveau. A condition qu'elles soient discrètes, et si possible un peu efficaces, la surdité peut passer inapercue. Le remède le plus simple en est, bien évidemment, l'amplification : les cornets acoustiques, basés sur le principe du recueil des sons extérieurs par un large pavillon aussi directionnel que possible, et d'une concentration de l'énergie recueillie sur une petite surface adaptable au conduit auditif du sujet, ont été les premières aides auditives à faire l'objet d'études industrielles et de commercialisation. Plus que les qualités techniques (gain et directivité), c'est la discrétion qui était recherchée : cacher un cornet acoustique dans les bras d'un fauteuil, dans le chapeau, la coiffe voire même la barbe du sujet qui en était porteur, était l'objectif des concepteurs, qui faisaient assaut d'astuces en la matière (fig.1).

Autre approche, et début de l'ère moderne, visant à s'affranchir des distances entre locuteurs et personne sourde, celle d'Alexander Graham Bell, qui pour dialoguer plus facilement avec sa femme sourde de naissance à travers leur vaste domicile familial, invente le téléphone... invention totalement dépourvue d'intérêt, lui objectent les industriels qu'il consulte pour développer son téléphone. Certes le téléphone ne s'est guère affirmé dans la voie initialement entrevue par Bell, mais son rejet par certaines compagnies restées à jamais anonymes, a sans aucun doute été la plus grande bourde de l'histoire de l'industrie, avec pour ces compagnies quelques centaines de milliards de dollars évanouis, où plus...!

Dès le début du XX<sup>ème</sup> siècle, les progrès spectaculaires de l'électronique et de l'électrotechnique, avec l'avènement des tubes à vide miniatures, des batteries à longue durée de vie et des microphones et écouteurs petits mais acoustiquement performants, ont permis la mise au point d'appareils auditifs avec un gain réel, avec des possibilités de réglages personnalisés en fonction du type et du profil de surdité







Figure 1
Différents modèles
d'aides auditives:
cornet acoustique,
fauteuil équipé de cornets,
et après quelques siècles
de tâtonnements,
aide auditive
électronique miniature
(de gauche à droite).

(selon la fréquence), et surtout avec une autonomie importante et une réelle portabilité. Seule la connectique inélégante, fils torsadés reliant le boîtier porté dans une poche ou à la ceinture, aux écouteurs intra-auriculaires. a donné à la célèbre marque "Sonotone" une réputation, imméritée et même quasi diffamatoire, d'appareils pour personnes pittoresques, gaffeuses, un peu séniles et de préférence à éviter en société...

L'avènement des semi-conducteurs et des composants miniatures permettant la réalisation d'aides auditives performantes portables entièrement derrière l'oreille, avec un gain d'entre 100 et 1000 en pression acoustique, et pourtant une autonomie d'une semaine avec une banale pile miniature, a fini par permettre de donner à la surdité l'image d'un terrain de haute technologie et aux sourds celle de personnes capables de réellement surmonter un handicap à la fois sensoriel et social. Les premières publicités délibérément agressives pour donner à la surdité une image positive ont été américaines, avec le grand golfeur Arnold Palmer qui se faisait photographier avec ses aides auditives en contour d'oreilles bien visibles, ou alors les Présidents Reagan et Clinton annonçant leur prochain rendez-vous chez l'audioprothésiste à grands renforts médiatiques (on a vu par la suite que d'autres pays n'ont pas tout à fait suivi cette évolution...); actuellement, l'équipe cycliste Phonak Hearing Systems défend au Tour de France et dans les pelotons les couleurs d'appareils auditifs suisses, qu'elle affiche sans complexe.

# I. Surdité: une simple affaire d'amplification?

L'image dans le grand public est une chose qui n'évolue que lentement. mais pourtant la surdité neuro-sensorielle a bel et bien subi une révolution, douce et progressive (et encore inachevée) mais une révolution quand même. Celle-ci a été physique et biophysique, médicale, chirurgicale parfois, et comme nous l'avons dit plus haut, électronique et technologique, avec de fortes interactions entre ces disciplines. Ces interactions sont nécessaires et l'électronique seule ne

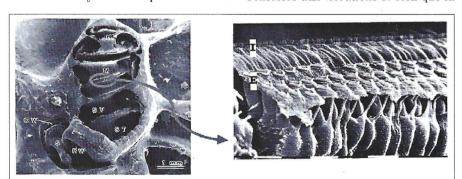
résout pas la question de la surdité (même si elle contribue à résoudre celle de son image en rendant l'appareillage discret et élégant).

Notamment, il ne faudrait pas conclure que dès lors que les appareils auditifs miniatures ont un gain suffisant pour faire entendre presque toutes les fréquences sonores à presque tous les sourds, la surdité appareillée n'est plus un handicap. Il serait tout aussi faux, en constatant que près de 80% des personnes qui devraient porter des appareils auditifs n'en portent pas, et que parmi les 20% restants, la moitié environ semblent insatisfaites. d'accuser les concepteurs d'appareils et ceux qui les adaptent de négligence ou d'incompétence. En fait, la surdité n'est pas seulement un besoin d'amplification, même si ce besoin est au premier plan, mais aussi (et parfois surtout) la traduction d'erreurs dans le processus de codage des sons par l'organe sensoriel auditif renfermé par l'oreille interne. Or l'immense majorité des appareils auditifs traitent le son à l'extérieur du corps humain et envoient à l'entrée du conduit auditif externe un son manipulé pour être plus efficace : ce ne sont donc pas des prothèses même si ce vocable erroné est entré dans le langage courant et les textes administratifs (par exemple ceux réglementant la profession d' "audioprothèse"). L'oreille interne défectueuse va donc obligatoirement être mise en jeu dans la réception du son, et comme elle le fait de manière pathologique, elle va dégrader le son mis en forme par l'appareil auditif : la surdité persiste sous sa forme "mauvais codage des sons".

Pour bien comprendre le challenge rencontré par ceux qui ont à restaurer l'audition d'une personne sourde, il faut donc analyser les étapes du fonctionnement de l'oreille normale et pathologique. Nous nous contenterons ici de décrire les étapes les plus fréquemment affectées par une pathologie. On estime que 4 millions d'individus en France sont atteints de surdité méritant un appareillage, la plupart du temps en relation avec des processus de vieillissement (la "presbyacousie"), et que 1 enfant sur 1000 naît avec une surdité. Ces surdités sont pratiquement toutes d'origine cochléaire (la cochlée ou limaçon étant la partie de l'oreille interne en charge du traitement des sons). Examinons donc brièvement le fonctionnement de la cochlée.

La cochlée est un tube enroulé sur luimême, d'une longueur de 30 mm environ dans l'espèce humaine (fig.2), parcouru longitudinalement par une membrane, dite membrane basilaire, qui sépare deux compartiments soumis à des pressions différentes : le compartiment supérieur est en effet connecté à un petit os en forme de piston, l'étrier, qui transmet les vibrations sonores de l'extérieur vers la cochlée. Sous l'effet de cette différence de pression, la membrane basilaire vibre à la cadence du son.

"Posées" sur cette membrane se trouvent les cellules sensorielles auditives alignées tout au long des 30 mm de la spirale cochléaire. On trouve ainsi environ 3000 cellules dites ciliées internes (ou CCI), alignées en une seule rangée, et juste à l'extérieur de celles-ci par rapport à l'axe de la cochlée, 3 à 4 rangées de cellules ciliées dites "externes" (CCE), au nombre de 10000 environ (fig.2, partie droite). Les "stéréocils" des cellules sensorielles sont extrêmement sensibles aux vibrations si bien que là



A gauche, vue au microscope de la cochlée, dans laquelle une fenêtre a été ouverte pour permettre de visualiser les rampes liquidiennes (SV, ST). La pression acoustique est transmise à SV par l'étrier (S) qui joue un rôle de piston. A droite, lorsqu'on "zoome" sur la membrane basilaire, on visualise les cellules sensorielles alignées (internes ou CCI, I et externes ou CCE, E).

où la membrane basilaire vibre, les stéréocils vibrent également. Leur déflection reste toutefois extrêmement faible : elle ne dépasse guère 1 degré, pour les stimulations les plus intenses tolérables. Ceci correspondrait, pour une structure de la taille de la Tour Eiffel, à une déflection de l'ordre du mètre, lors des plus violentes tempêtes... Pour des stimulus plus quotidiens, la déflexion des stéréocils plus sensibles est donc plutôt nanométrique!

La capacité du système auditif à détecter des vibrations n'affectant pourtant les structures sensorielles qu'à une échelle subatomique, puisqu'on a pu établir que les sons au seuil auditif entraînent des mouvements ne dépassant pas quelques fractions du diamètre de l'atome d'hydrogène, nous conduit donc aux limites ultimes de la physique. La construction effective de capteurs physiques aussi sensibles poserait des problèmes techniques extrêmes. La question des mécanismes permettant à un organe biologique de petites dimensions, baignant dans un liquide visqueux qui rend difficile à une résonance d'atteindre un facteur de qualité appréciable, de répondre aux sons extérieurs avec une telle sensibilité et une telle finesse, est critique pour comprendre l'audition. Elle a été soulevée à l'époque d'Hermann von Helmholtz, par le grand physicien et physiologiste lui-même, puis reprise par un autre grand physicien, prix Nobel de médecine en 1961, Georg von Békésy, mais sans atteindre une réponse complète satisfaisante. Nous reviendrons dans quelques lignes à leur vision des choses.

C'est un autre physicien de génie qui a été à l'origine de l'idée centrale : l'astrophysicien et cosmologiste Thomas Gold, disparu il y a quelques semaines seulement. Né en Autriche puis installé en Angleterre, en 1948, jeune chercheur à l'observatoire de Jodrell Bank (et sur le point de découvrir l'origine des pulsars), il fait l'hypothèse que l'oreille interne utilise la même astuce que les systèmes radiofréquence, récemment développés jusqu'à un stade qui en a, incidemment, fait les clés de la victoire alliée contre les forces hitlériennes. Ces systèmes combattent les effets néfastes de l'amortissement de type visqueux ou résistif,

qui rend les résonances moins amples et plus étalées dans le domaine fréquentiel, en régénérant l'énergie perdue, cycle par cycle, au moven d'une boucle de rétrocontrôle. Ceci consiste en ce qu'une petite fraction de l'énergie en sortie du système résonnant est réinjectée à l'entrée (sans dépense énergétique donc, c'est seulement un prélèvement partiel) : si elle a le déphasage correct, elle vient s'ajouter à la stimulation extérieure pour la renforcer, l'amplifier. Si le déphasage n'est pas optimal (c'est ce qui se produira si le système de rétrocontrôle agit à une cadence trop rapide ou trop lente, donc aux fréquences hors résonance), la combinaison stimulus extérieur / énergie réinjectée n'est pas renforcée, et peut même être atténuée. La résonance finalement obtenue atteint un maximum beaucoup plus ample qu'en l'absence de rétrocontrôle (le système bénéficie donc d'un gain), et ce maximum concerne un intervalle de fréquences beaucoup plus étroit, si bien que le système gagne à la fois en amplitude et en sélectivité fréquentielle (fig.3).

Gold proposait en 1948 que ce soit le cas pour le système sensoriel cochléaire, et à l'appui de sa théorie, proposait aussi que les acouphènes,

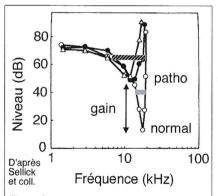


Figure 3 Ce diagramme représente des courbes d'accord (une normale et deux pathologiques), donnant pour chaque fréquence le niveau minimum à appliquer pour déplacer la membrane basilaire cochléaire d'une certaine quantité (très faible, proche de celle juste suffisante pour permettre la détection). Les courbes d'accord ressemblent à des courbes de résonance imprimées à l'envers. La résonance normale est beaucoup plus pointue que la pathologique, avec un gain de 40 dB matérialisé par l'écart vertical entre courbes à l'abscisse correspondant à la meilleure fréquence. Le gain est associé à une finesse de résonance plus grande (matérialisée par les bandes horizontales épaisses, qui indiquent une sorte de bande passante).

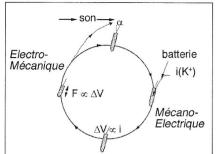
"sons" entendus par certains individus en l'absence de tout stimulus sonore extérieur, traduisaient l'instabilité possible du système : La présence d'un rétrocontrôle engendre en effet une tendance à l'instabilité et à l' "accrochage", entraînant des sifflements spontanés à chaque fois que l'énergie réinjectée par la boucle de contrôle dépasse l'énergie perdue par frottements (le système a alors une résistance équivalente négative). La tendance aux sifflements était une caractéristique bien connue des détecteurs radio des années 48 ! Hélas, cette théorie des acouphènes. si séduisante qu'elle était, s'est révélée fausse, les acouphènes étant en fait des phénomènes neuronaux et non mécaniques. La deuxième difficulté qui a fait que Gold n'a pas été cru, jusqu'à la fin des années 70, consistait à trouver l'élément capable d'exercer un rétrocontrôle sur la cochlée, en lui réinjectant de l'énergie mécanique, cycle par cycle... Il a fallu attendre les années 1983-85 pour s'apercevoir que c'était les cellules ciliées externes de la cochlée qui hébergeaient un mécanisme aussi extraordinaire.

# II. Les cellules sensorielles auditives, des amplificateurs très spéciaux

Rappelons tout d'abord la théorie d'Helmholtz, et celle de von Békésy (ces deux théories divergent sur un certain nombre de détails, mais nous nous limiterons à en rappeler les grandes lignes convergentes). Pour eux, la membrane basilaire cochléaire se comporte comme une batterie de résonateurs alignés dans un ordre de fréquences de résonance décroissantes, de l'étrier au sommet de la cochlée. Telle une harpe, la membrane basilaire cochléaire donne un maximum de vibrations au voisinage de l'étrier en réponse à un son de 20 kHz, et au voisinage du sommet pour un son de 20 Hz. Entre ces deux fréquences extrêmes correspondant aux limites spectrales de la sensibilité auditive humaine, le maximum de vibrations de la membrane basilaire se décale d'environ 3 mm à chaque décalage de fréquences d'une octave (un intervalle d'une octave sépare deux fréquences dont l'une est double de l'autre). Il reste aux cellules sensorielles à transformer les vibrations en impulsions électriques, et aux neurones auditifs à les véhiculer jusqu'aux centres cérébraux. L'identité des neurones qui répondent signe la fréquence envoyée : les neurones qui répondent à 10 kHz, par exemple. sont ceux qui se connectent aux cellules sensorielles situées 3 mm au-delà de l'étrier (6 mm pour 5 kHz. 9 mm pour 2,5 kHz, etc... en appliquant la règle énoncée plus haut de 3 mm / octave).

L'inconvénient des 2 théories est que les maximums produits par deux fréquences même éloignées risquent de se recouvrir si les résonances cochléaires sont amorties comme prévu. La solution de Gold est qu'en fait les résonances cochléaires ne sont que très peu amorties, si bien que deux fréquences telles que 1000 Hz et 1003 Hz donnent des maxima nets, non recouvrants, distants longitudinalement d'un diamètre cellulaire ! ce ne seront donc pas les mêmes cellules qui répondront à 1000 et 1003 Hz. ni les mêmes neurones, et c'est comme cela que le cerveau distingue sans ambiguïté ces deux fréquences... (cette performance est en effet possible avec un peu d'entraînement, et l'on dit que le "seuil différentiel de fréquences" est de pour 3 mille, inexplicable par Békésy ou Helmholtz). La théorie de Gold (fig.4) va plus loin : elle explique qu'on peut détecter un son de 1000 Hz à 0 dB (le dB est une unité d'acousticiens, et 0 dB en acoustique physiologique correspond à une pression acoustique de 0, 000 02 Pa, qui entraîne une déflexion initiale des structures intracochléaires de 0,01 fois le diamètre de l'atome d'hydrogène : la sensibilité auditive est donc extraordinaire) parce que le mécanisme de rétrocontrôle compensateur de frottements apporte un gain de 60 dB: l'amplitude des vibrations, dans une zone cochléaire très étroite où rétrocontrôle et son extérieur sont parfaitement en phase, est multipliée par 1000!

Enfin, la théorie de Gold explique aisément que les mouvements de la membrane basilaire ont un comportement particulier, dit "compressif", lorsque le niveau d'un son augmente (fig.5). A



Boucle de rétrocontrôle de Gold. Le son entraîne une déflexion des stéréocils des CCE (d'un angle a) Ceci ouvre des canaux ioniques qui laissent passer les ions notassium K+ noussés par une différence de potentiel positive maintenue grâce au métabolisme cochléaire. C'est l'étape de transduction dite mécano-électrique, la vibration acoustique donnant lieu à une variation oscillante de potentiel de membrane cellulaire (DV). Or lorsque leur potentiel de membrane varie, les CCE se mettent à vibrer (étape électromécanique), donc à produire un son qui peut éventuellement venir renforcer le son extérieur. Le fonctionnement en boucle va, à chaque "tour" de boucle, amplifier les effets de cette rétroaction. Il existe des mécanismes limiteurs évitant une instabilité. mécanismes encore mal compris.

bas niveau, les cellules ciliées externes agissent sur le son extérieur pour l'amplifier de 1000, mais au fur et à mesure que le niveau extérieur du son augmente, les cellules, dont la puissance mécanique est limitée, peuvent de moins en moins contribuer à la stimulation totale de manière importante : leur apport et le gain qui en résulte diminue naturellement, de sorte que le gain finit par s'annuler lorsque le son extérieur atteint

80-90 dB. L'augmentation d'amplitude des vibrations de la membrane basilaire avec le niveau de stimulation s'en trouve ralentie. Au lieu d'être de 1 dB par dB d'augmentation du niveau sonore extérieur, elle n'est que de l'ordre de 0,25 dB / dB, ce qui correspond à une forte compression (on le voit aisément en considérant le gain comme indiqué plus haut : lorsque le niveau acoustique passe de 0 à 80 dB, la vibration résultante de la membrane basilaire passe de 60 dB puisque le gain était de 60 – à 80 dB puisque le gain est devenu zéro). Cette compression est nécessaire pour les neurones auditifs, car ceuxci comme tous les neurones sont caractérisés par une faible dynamique, de l'ordre de 40 dB. Ils ne pourraient donc pas "encaisser" une possible variation de 120 dB (intervalle séparant le plus faible et le plus fort son audibles), alors que la compression cochléaire ramène cet intervalle à une variation "effective" 4 fois plus faible. En l'absence d'action des CCE, on s'attend donc à observer une triade de symptômes auditifs : une surdité (par disparition du gain apporté par la boucle de Gold), une perte de sélectivité fréquentielle (par élargissement des résonances mécaniques de la membrane basilaire) et une mauvaise tolérance des sons forts (par perte de compression cochléaire) et c'est en effet ce qui est décrit par la plupart des personnes sourdes.

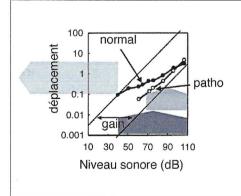


Figure 5
La courbe qui relie le niveau d'entrée dans la cochlée et la réponse n'est linéaire (suivant la diagonale du graphique, de pente 1 dB pour 1 dB) que si la cochlée a vu ces CCE détruites. Sinon, elle est aplatie. Pour une dynamique fixée par les capacités neuronales, en sortie (bande grisée horizontale, 30 à 40 dB), on peut s'accommoder de seulement 30-40 dB également en cas de CCE pathologiques (bande grisée verticale claire), alors que la dynamique à l'entrée dépasse 70-80 dB (bande grisée verticale foncée) dans une cochlée saine.

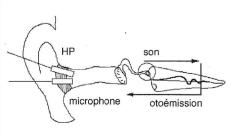


Figure 6
L'activité des CCE se traduit par l'émission de sons, au décours du fonctionnement de la boucle de rétroaction de Gold. Ces sons peuvent être détectés très simplement en quelques secondes par un microphone dans le conduit auditif externe, et s'appellent otoémissions acoustiques, très utiles pour mesurer l'état des CCE, même chez le nourrisson.

# III. Cochlée et sons complexes, entendre... et comprendre ?

On peut résumer la manière dont les sons complexes de la vie quotidienne (constitués d'un mélange de fréquences présentées simultanément) sont codés pour être ensuite interprétés, de la manière suivante. Lorsque la cochlée reçoit les vibrations acoustiques qui lui sont transmises via le conduit auditif et grâce à l'action de la chaîne constituée par la membrane tympanique et les osselets de l'oreille moyenne, elle résonne à des endroits différents de sa membrane basilaire. chacun de ces endroits correspondant à une des fréquences constituant le son complexe présenté. Les maximums de vibration sont amplifiés grâce au gain apporté par les cellules ciliées externes. Plus la sélectivité fréquentielle est grande, toujours grâce aux cellules ciliées externes, mieux les fréquences parasites (souvent présentes dans le signal, sous forme notamment de bruit de fond) sont séparées des fréquences utiles (fig.7). Enfin la compression s'applique, si bien que les contrastes entre maximums restent dans les limites de ce que les neurones peuvent coder. Les cellules ciliées internes voisines de chaque maximum de vibration sur la membrane basilaire réagissent aux vibrations et informent les neurones du nerf auditif situés à leur base de la présence d'une vibration et de la taille de cette vibration. Les neurones véhiculent l'information sous forme d'impulsions électriques, dont la cadence informe sur l'intensité de chaque vibration. La position de chaque maximum est indiquée simplement par l'identité des neurones qui répondent le plus : chaque neurone est repéré une fois pour toutes dans les centres nerveux par sa meilleure fréquence. Si elle est 2354 Hz, par exemple, le fait que le neurone réponde indique que la fréquence 2354 Hz est contenue dans le signal.

L'ensemble de ces mécanismes correspond de très près à l'analyse mathématique de Fourier (Fig.7; Joseph Fourier était mathématicien au début du XIXème siècle), qui permet de décomposer de manière unique un son périodique en une série de sinus. Le "spectre" véhiculé par les neurones auditifs à chaque instant est le spectre instantané du son présenté, et le caractérise entièrement, permettant ainsi de l'identifier, et finalement de le comprendre. (Autant le passage d'entendre à comprendre semble automatique chez l'adulte, autant chez le

jeune enfant en train d'apprendre sa langue maternelle, avant 2 ans / 2 ans et demi donc, il est délicat et met en jeu des processus d'apprentissage complexes).

En présence d'une surdité neurosensorielle typique, avec lésion des CCE, le profil de vibrations de la membrane basilaire est trop peu ample (à cause de la perte de sensibilité), trop flou (à cause de la perte de sélectivité) et trop contrasté (à cause de la perte de compression). Trop peu de neurones répondent à faible niveau, donc certaines fréquences importantes sont oubliées par le système auditif. Ainsi, des sons différents comme /ou/ et /i/. qui se distinguent par une composante à haute fréquence pour le i, finissent par se ressembler. A plus fort niveau (le sujet sourd demande souvent qu'on lui parle plus fort), les vibrations produites par des sons différents se ressemblent car les maximums associés à chaque fréquence constituant les sons sont trop larges et les sons se trouvent alors confondus (les confusions incessantes du professeur Tournesol ont été immortalisées par Hergé et traduisent le fait que devant les ambiguïtés qui l'empêchent de différencier les sons de sons voisins, le sujet sourd, pour tenter de comprendre, invente un sens qui finalement peut se retrouver très éloigné du sens initial: il entend mais ne comprend pas). Ces difficultés sont accentuées en présence de bruits parasites, ou de conversations concurrentes. Seul à seul, un sujet sourd peut très bien suivre son interlocuteur, mais il est complètement perdu en réunion ou dans un lieu public. A niveau à peine plus fort, le sujet sourd se plaint de distorsions car la perte de sa compression naturelle force ses neurones auditifs à travailler à saturation.

# b aaaaa biiiiiiii boooo b uuuuu aaa temps (secondes)

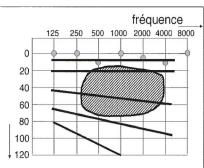
Figure 7
Un sonagramme donne d'un son complexe (trace du haut, en fonction du temps), une décomposition fréquentielle en fonction du temps. L'analyse mathématique inventée par Joseph Fourier le permet aisément. Les sons de parole différents donnent des spectres différents, caractéristiques, même s'ils sont chantés sur la même note. La cochlée reconstruit sur sa membrane basilaire ce spectre (schéma de droite, où une membrane est représentée déroulée avec la partie codant pour les hautes fréquences vers le haut). Le trait gras représente l'enveloppe de vibration de la membrane en présence d'un son /a/, les 3 pics correspondent aux 3 bandes en surbrillance dans le sonagramme. Le profil se retrouve ensuite dans le diagramme d'activités du nerf auditif, qui en somme "véhicule" un sonagramme).

# IV. Appareillage, apports et limites

Si maintenant le sujet est appareillé au moyen d'une aide auditive moderne, sans doute numérique donc, l'amplification que les circuits électroniques peuvent apporter va être ajustée selon le seuil auditif à chaque fréquence importante, de sorte que la sensibilité à la plupart des composan-

tes fréquentielles des sons courants va être restaurée. Les aides auditives restent en difficulté pour les sons de fréquence élevée, notamment parce que les écouteurs sont peu performants à ces fréquences, et aussi parce que la miniaturisation, qui permet un grand confort, force en contrepartie les fabricants à placer le microphone détecteur des sons extérieurs très près de l'écouteur. En présence d'un gain électronique élevé, il y a risque d'effet Larsen (qui se traduit par des sifflements aigus intenses lorsque l'aide auditive est réglée avec un gain excessif). Des compressions électroniques "intelligentes" peuvent désormais aisément être programmées : l'aide calcule à chaque instant le gain idéal, fréquence par fréquence, qui évite aux composantes spectrales des sons d'atteindre un niveau excessif. Le seul problème restant, mais il est de taille, est que le son amplifié reste envoyé à la cochlée sourde (c'est pourquoi l'aide auditive n'est pas une "prothèse" : elle ne remplace pas mais assiste), et celle-ci a perdu sa sélectivité en fréquences : donc le message mis en forme par l'aide auditive va être déformé avant que le nerf auditif ne l'appréhende. La compression électronique peut se substituer à celle, manquante, de la cochlée, mais il reste extrêmement difficile de coder les sons d'une manière qui force la cochlée pathologique à séparer les fréquences qui le constituent.

Les surdités neurosensorielles sont généralement classées par degré : légères, moyennes, sévères et profondes. Le profil typique constaté à l'audiogramme (fig.8), graphique qui représente la perte auditive en ordonnée, en fonction de la fréquence en abscisse, est en pente décroissante lorsque la fréquence augmente : plus la fréquence est élevée, plus la surdité est importante. Toutefois d'autres profils peuvent également être rencontrés. Une perte auditive haute fréquence pénalise la compréhension des sons de la parole, même si l'audition est normale aux basses fréquences, parce que de nombreux phonèmes de la parole se différencient grâce aux composantes de haute fréquence de leur spectre. Un sujet avec une surdité légère comprend mal la parole chuchotée, mais à l'autre extrémité, une surdité sévère rend impossible la détection de la parole à un niveau



seuil (décibel ou dB)

Figure 8 Un audiogramme tonal liminaire représente le niveau minimum auquel un son pur (une seule composante fréquentielle f) est percu. en fonction de f en Hz (seules quelques fréquences judicieusement réparties dans le champ auditif sont testées). Au-dessus de 20 dB, l'audition est normale. En dessous de cette limite, il existe une perte auditive. Les traits juxtaposés représentent des audiogrammes représentatifs de surdités, de haut en bas, légère, moyenne, sévère et profonde. La zone importante pour les sons de la parole est représentée par l'ovale hachuré. On voit donc que les sourds sévères et profonds ne perçoivent rien de la parole sans amplification. L'amplification apportée par une aide auditive relève les seuils de perception de manière à les placer si possible autour de 40-50 dB. Hélas, elle relève aussi le seuil d'intolérance qui au lieu d'être autour de 110 dB, se manifeste pour des sons normalement forts mais bien tolérés. La compression d'une aide auditive peut limiter ce problème, mais pas le faire disparaître, notamment pour les surdités les plus profondes.

naturel. Une surdité profonde nécessite une amplification importante de la parole. En raison de la perte de compression du système auditif périphérique, cette amplification importante va tout juste permettre aux sons normaux d'être détectés, mais les sons un peu plus intenses vont être très mal tolérés car ils engendrent une sensation de force excessive! Une règle approximative est que le seuil de détection s'élève en cas de surdité, mais le seuil d'intolérance reste fixe : l'intervalle utile est donc de plus en plus étroit lorsque la surdité s'aggrave de légère à profonde. Ainsi, la différence pratique entre surdité sévère et profonde, qui peut se limiter à 20 ou 30 dB seulement en termes de seuil de détection, est énorme sur le plan des résultats de l'appareillage : la surdité d'un enfant sourd sévère bien appareillé peut passer inaperçue après quelques années d'éducation auditive, mais celle d'un enfant sourd profond a souvent des conséquences durables.

# V. En cas de surdité très profonde, l'implant cochléaire ?

A la limite, dans le cas où la cochlée a perdu toutes ses capacités à coder, et toute sa dynamique, une aide auditive amplificatrice, même de très grande puissance, peut devenir totalement inefficace donc illusoire, même si on procède toujours à un essai (l'audiologie n'est pas une science exacte!). La solution qui s'est imposée progressivement, depuis une dizaine d'années. au fur et à mesure de sa mise au point, est la mise en place d'un implant cochléaire. Un implant est constitué d'un porte-électrodes qui est inséré chirurgicalement, à l'issue d'une brève intervention, dans la cochlée de manière à s'enrouler autour de l'axe osseux de celle-ci. Les électrodes, au nombre de 15 à 22 ou plus, se trouvent alors naturellement positionnées au niveau de neurones codant pour fréquences progressivement décroissantes, de la base au sommet de la cochlée : si les cellules sensorielles ont disparu, les neurones, eux, restent généralement présents. Il suffit alors de programmer chaque électrode pour émettre des impulsions électriques lorsqu'une fréquence particulière est détectée dans le son extérieur (fig.9). Un processeur externe communique par antenne avec la partie implantée et effectue l'analyse des sons et la programmation, en temps réel, des électrodes. L'implant reconstitue le travail que faisaient les CCI, et le processeur effectue le travail des CCE (si ce n'est qu'au lieu de 9000 CCE, il n'y a que 2 dizaines d'électrodes...., mais il a pu être montré que le résultat peut être efficace, pour la compréhension, dès que plus de 6 électrodes sont actives!)

D'autres surdités neurosensorielles que celles, typiques, décrites plus haut, existent et ont été de mieux en mieux identifiées et décrites depuis quelques années. Celles qui touchent plutôt les cellules ciliées internes, responsable du codage, ou les neurones auditifs, sont appelées "neuropathies auditives". Elles rendent le codage des sons brouillé, même lorsque les CCE ont bien effectué leur travail de filtrage et d'amplification. Mettre en route un appareillage conventionnel, à

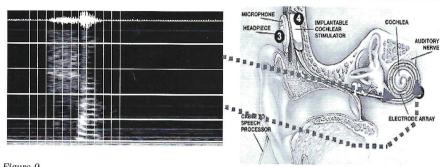


Figure 9
Principe d'un implant cochléaire. Le son incident est analysé en temps réel, de manière à en dresser une représentation de type sonagrammétrique (par tranches temporelles très brèves matérialisées par les lignes verticales). L'espace des fréquences est découpé en intervalles (lignes horizontales) et à chaque instant, le processeur calcule le plan des électrodes à stimuler (tirets en gras). Celles-ci recréent au voisinage des neurones auditifs une excitation similaire à celle obtenue naturellement, bien que moins fine en raison du nombre limité d'électrodes. Le processeur est actuellement externe et communique avec la partie implantée (4) par une antenne (3) qui rayonne à travers la peau du crâne.

base d'amplification et de compression, n'a aucun sens car les CCE effectuent déjà très bien ce travail. L'absence de compréhension des messages provient ici non d'un tri fréquentiel mal effectué, mais d'une désynchronisation des impulsions dans le nerf auditif. Or le cerveau exploite beaucoup les données de synchronisation entre groupes de neurones pour construire un "paysage" auditif cohérent. La seule manière (un peu radicale) que l'on connaisse jusqu'à maintenant pour re-synchroniser les neurones auditifs est de placer un implant cochléaire... dans une cochlée en partie saine, mais dont l'action mécanique intacte est hélas inutile : on va donc lui substituer une action électrique extérieure, seule capable de donner des messages utilisables dans les voies nerveuses.

Jusqu'à il y a peu, les implants cochléaires nécessitaient une réflexion poussée avant leur prescription car leur mise en place détruisait les structures cochléaires, rendant l'intervention (unilatérale, d'ailleurs) irréversible. Les nouvelles générations d'implants sont en passe de surmonter cet obstacle. Le dernier obstacle, et non le moindre, est le coût de l'implant, de son processeur et de l'intervention chirurgicale de mise en place. Il ne faut pas non plus négliger la question du suivi et de la rééducation (les messages électriques délivrés par l'implant ne sont utilisables sans effort qu'après entraînement de quelques mois ou années : il s'agit pratiquement de l'apprentissage d'une langue - pour l'enfant sourd de naissance -, ou au moins d'un dialecte étranger ...).

L'objet de cet exposé a été de montrer comment des collaborations entre disciplines très éloignées et très pointues (de la cosmologie de Gold à l'électronique appliquée en passant par les algorithmes de Fourier, de Turing, les résonances de Helmholtz. l'onde propagée de von Békésy, etc) ont conduit en deux siècles l'avenir des sourds de celui, dépressif, de Beethoven, à celui d'un citoyen parfaitement intégré dans la société, avenir qui devrait (ou en tout cas pourrait) être celui de la majorité des enfants sourds de naissance d'ici quelques années... La démarche

même de diagnostic et de choix de stratégie, à l'échelle d'une ville de movenne importance comme Clermont-Ferrand, a conduit à un regroupement entre activités. les ORL étant parties intégrantes d'une équipe de recherche fondamentale en Biophysique tandis que le biophysicien exerce ses activités hospitalières en exploration auditive en ORL. Le fait qu'en deux décennies l'avènement d'appareils auditifs basés sur de nouveaux concepts, mais aussi de méthodes diagnostiques rapides et efficaces ont eu lieu en parallèle donne quelques raisons d'espérer. Cependant l'aide auditive idéale reste encore à inventer (fig.10) tant les performances du couple oreille / cerveau sont normalement impressionnantes. Dans cette attente, on sait que le cerveau peut retrouver des moyens d'interprétation de messages même imparfaits à condition de ne pas être laissé trop longtemps au repos : c'est pourquoi les enfants sourds doivent être pris en charge bien avant l'âge de 2 ans. et les adultes sourds devraient l'être dès que leurs performances non appareillées déclinent.

C'est le challenge des quelques années à venir.

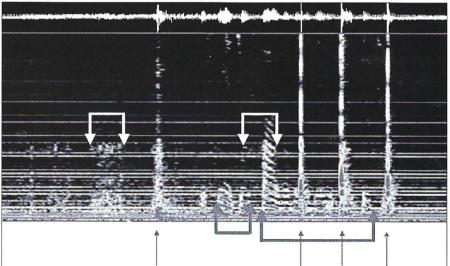


Figure 10
le processeur idéal serait capable, à partir d'une "scène auditive" comme celle représentée par
le sonagramme ci-dessus, d'extraire les groupes de fréquences caractéristiques (par exemple,
parce qu'elles démarrent et s'arrêtent en même temps, ou encore parce qu'elles sont toutes multiples entières d'une fréquence de base, fondamentale). Ici, la parole (flèches en sombre,
gras) est superposée à des bruit de marteau (flèches fines) et à des bruits de large spectre (flèches
blanches), ainsi qu'à des sifflements continus (rayures horizontales). Le cerveau sépare avec une
aisance extraordinaire ces diverses sources lorsque le message est transmis par des cochlées
normales, mais peine lorsque les cochlées pathologiques ont distordu les messages. Une aide
auditive "intelligente" viendrait reconnaître les passages à problème et compenserait l'action
néfaste des cochlées. Pour le moment, en 2004, la tâche de reconnaissance automatique de parole
dans le bruit reste très imparfaitement résolue même par les ordinateurs les plus puissants.





# L'Orgue

# Par Henri Bouffard

Organiste et Facteur d'orgues. Article N°2 (suite au N° 58 d'Auvergne-Sciences)

# Tuyaux d'orgue à embouchure de flûte et à anche battante

(La suite de cet article consacrée à la réalisation des tuyaux à bouche, ainsi que les tuyaux à anche battante feront l'objet d'un article dans de prochains numéros).

La facture d'orgue a fait le choix d'utiliser ces 2 types de tuyaux pour produire les sons.

Au couple air-énergie est associé le couple excitateur-résonateur.

L'excitateur transmet une partie de l'énergie qu'il reçoit par le vent, au résonateur qui a souvent un rôle d'amplificateur.

Dans les tuyaux d'orgue, il y a une excitation de la colonne d'air par action du vent soit sur une arête fixe, pour les tuyaux à bouche (ou à embouchure de flûte), soit sur une languette mobile pour les tuyaux à anche.

La notion de vent dans l'orgue - mise en vitesse de l'air par de la pression en moyenne de 750 Pascals - est constituée par un autre couple indissociable : le débit et la pression dont la valeur détermine l'énergie disponible vers l'excitateur. Cette énergie se consomme pendant que le tuyau émet un son.

L'excitateur c'est ce qui bouge, qui est dynamique, qui transmet de l'énergie. Un excitateur efficace transmet le maximum de l'énergie qu'il reçoit à son résonateur. Un résonateur est un transformateur statique d'énergie plus ou moins actif et efficace; son rôle d'amplificateur est plus ou moins intense.

Dans les tuyaux d'orgue, le résonateur efficace a toujours une enveloppe rigide, absorbe peu d'énergie et ne la gaspille pas par des vibrations parasites.

Dans un tuyau à bouche, l'excitateur c'est le vent qui vient frapper la lèvre supérieure du tuyau; le résonateur est constitué par le corps du tuyau qui prolonge la bouche dont la lèvre supérieure fait partie.

Dans un tuyau à anche, l'excitateur est constitué par l'ensemble de l'anche excitée par le vent et, en particulier, la languette qui est la seule partie mobile. Le résonateur est le tuyau qui prolonge l'anche.

# I. Tuyaux à bouche

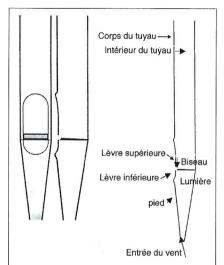
Ils représentent environ 80% de l'ensemble des tuyaux sur un orgue les 20% restants étant constitués des tuyaux à anche. Ces proportions sont variables.

Le tuyau à bouche est très voisin de la flûte à bec dans son principe. Toutefois le tuyau d'orgue à bouche n'a pas de trous latéraux et n'émet qu'un son à fréquence fixe. Il est en bois ou en alliage étain-plomb.

#### **Description:**

Les croquis suivants montrent la position des principaux organes et leur appellation.

Dans les tuyaux à bouche toutes les parties sont fixes, statiques.



Tuyau à bouche en métal, vue de face et en coupe. A droite sont indiquées par une petite flèche les parties principales d'un tuyau à bouche.

La lumière, difficile à montrer, est l'espace compris entre la pointe de la lèvre inférieure et l'arête du biseau. Le bord de la lèvre inférieure est aligné sur l'arête du biseau. Les bords des 2 lèvres sont alignés à peu près.

La hauteur du pied est variable, au minimum 20 cm environ.

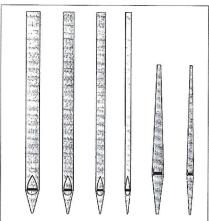
Chaque tuyau à bouche en métal comporte 3 parties soudées entre elles : le pied, le corps du tuyau, le biseau.

#### Familles des tuyaux à bouche :

- tuyaux ouverts : l'extrémité du tuyau opposée à la bouche débouche à l'air libre.
- tuyaux semi-ouverts ou semifermés: l'extrémité du tuyau opposée à la bouche soit comporte un rétrécissement, soit un orifice de diamètre très nettement inférieur au diamètre du tuyau; cet orifice prolongé par un petit tuyau est appelé cheminée.
- tuyaux fermés: l'extrémité du tuyau opposée à la bouche est obturée par un fond en général mobile pour permettre l'accord. Ce type de tuyau est spécifique à l'orgue.

Voir les croquis ci après.

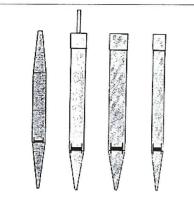
L'orgue, instrument à sons fixes préréglés, utilise des tuyaux dans les trois familles pour obtenir des sons de timbres et d'intensité différents.



Vue de face de tuyaux à bouche : à gauche les 4 premiers sont des tuyaux ouverts : l'extrémité du corps du tuyau est libre. On découvre qu'il y a plusieurs possibilités de diamètre pour une même longueur de tuyau. Les 2 tuyaux de droite sont semi-ouverts : l'extrémité du tuyau est resserrée. On constate que plus un tuyau se resserre en bout et plus sa longueur est diminuée pour émettre la même fréquence.

Les tuyaux à bouche sont réalisés le plus souvent en alliage étain-plomb mais aussi en bois.

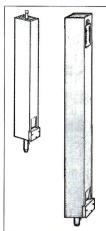
Comme déjà indiqué, la longueur d'un tuyau fermé est 2 fois plus petite qu'un tuyau ouvert donnant la même fréquence : c'est la loi des tuyaux. Les tuyaux fermés donnent un son doux et velouté.



Les 2 tuyaux de gauche sont semi-ouverts : le premier possède une partie de tuyau. Le tuyau de gauche est semi-ouvert et est constitué d'une partie cylindrique prolongée par une partie conique avec resserrement à l'extrémité.

Le second est un tuyau dit "à cheminée" : le tuyau est prolongé par un petit tuyau appelé cheminée. Le tuyau n'est ni complètement ouvert ni complètement fermé. Les 2 tuyaux de droite sont de la famille des tuyaux en métal "fermés".

La partie supérieure du tuyau possède un couvercle appelé calotte, qui est utilisé par l'harmoniste pour accorder le tuyau. Tous les tuyaux fermés et semi-fermés en métal ont de chaque côté de leur bouche, 2 petites lames de métal qui sont soudées : en rapprochant ou en éloignant ces "oreilles", l'harmoniste peut ajuster avec précision l'accord définitif du tuyau.



Tuyau en bois fermé, montrant sa forme rectangulaire avec une profondeur plus grande que la largeur. Le pied possède un petit papillon de réglage de la pression du vent. La lèvre supérieure est fixée par 3 vis et est donc démontable. L'extrémité du tuyau possède un tampon en bois avec une poignée verticale.

En enfonçant ou en tirant ce tampon, l'harmoniste peut ajuster l'accord du tuyau. Le son de ces tuyaux fermés en bois est plutôt doux, sourd mais ample dans les grandes longueurs. Il est fin et timbré pour les petits tuyaux. Les jeux les plus significatifs sont la SOUBASSE et le BOURDON. Les tuyaux en bois semi-ouverts sont rarement utilisés. La douceur du son est liée à l'épaisseur importante de la lèvre inférieure qui agit comme un frein en diminuant la vitesse du vent. Même chose pour les tuyaux ouverts. Le tuyau de droite est un tuyau en bois ouvert. Là encore, sa longueur est le double du tuyau fermé. Pour accorder un tel tuyau, on rapporte une plaque en bois vers le haut du tuyau : en modifiant la position de cette plaque, l'harmoniste modifie l'accord du tuyau. Cette plaque se voit sur le haut du tuyau en face avant.

Ce type de tuyau est utilisé pour les jeux de pédale le plus souvent. Le son est particulièrement ample. Les jeux les plus caractéristiques sont la FLUTE et la CONTRE-BASSE. En diminuant la section, d'autres jeux sont possibles comme la GAMBE.

Ensemble de tuyaux ouverts en bois, vue de face, montrant la variété des formes possibles qui influent profondément sur le timbre. Pour des formes identiques, la section est variable. L'essence du bois, elle aussi, peut être modifiée à volonté.

A noter que la section d'un tuyau en bois est toujours carrée ou rectangulaire, jamais circulaire pour des raisons de fabrication. A la variété des formes du tuyau s'ajoute celle des bouches : absence d'oreilles mais ajout de certaines parties devant la bouche pour stabiliser le son. Les pieds ont un dispositif de réglage de section de passage du vent.

Name	at	destinations	doe	iony	da	tuvouv	à	houcho
IVUIIIS	CL	uesunations	ues	jeux	ue	tuyaux	d	Douche

NOMS DES JEUX	JEUX DE BASE : harmoniques pairs	MUTATIONS : harmoniques impairs
PRINCIPAUX	Principal 32' Principal ou Montre 16'	Grosse Quinte 32/3' Grande Quinte 16/3'
Taille moyenne Tuyaux ouverts	Principal ou Montre 8' Principal ou Prestant 4' Doublette 2'	Quinte 8/3' Quinte 4/3' Grande Tierce 16/5'
PLEIN-JEU, FOURNITURES	Sifflet 1' Tuyaux ouverts de taille	Tierce 8/5' moyenne où alternent
CYMBALES	les harmoniques pairs et	impairs
FLÛTES OUVERTES Taille large Tuyaux ouverts	Flûte 32'   Flûte 16'   Flûte 8' - Flûte 4'   Flûte 2' - Picocolo 1'	Gros Nasard 32/3' Grand Nasard 16/3' Nasard 8/3' - Larigo 4/3'
FLÛTES HARMONIQUES Taille large Tuyaux ouverts	Flûte harmonique 8' Flûte octaviante 4' Octavin 2'	
JEUX GAMBES Taille étroite Tuyaux ouverts	Gambe 16' - Gambe 8' Salicional 8' - Salicional 4' Voix céleste 8' - Unda Maris 8'	
TUYAUX SEMI-OUVERTS Taille large ou moyenne Tuyaux coniques	Gemshorn 16' - Gemshorn 8' Gemshorn 4' Gemshorn 2'	
TUYAUX SEMI-FERMES Taille large Tuyaux avec tampon ou calotte	Flûte à cheminée 8' Flûte à cheminée 4'	
TUYAUX FERMES Taille large Tuyaux avec tampon ou calotte	Contre-Soubasse 32' - Soubasse 16' Bourdon 16' - Bourdon 8' Bourdon 4'	Nasard 8/3' (Octave 1)
TUYAUX FERMES Taille étroite Tuyaux avec tampon ou calotte	Quintaton 32' Quintaton 16' Quintaton 8'	

### Sortes de tuyaux par familles :

Plusieurs caractéristiques les différentient :

- leur forme, soit de section circulaire pour tous les tuyaux en métal, cylindrique ou conique, soit de section rectangulaire pour les tuyaux en bois
- leur rapport L/D, ou longueur du tuyau divisé par son diamètre. Ce rapport est variable sur les 56 à 61 tuyaux d'un même jeu. Il constitue le diapason de chaque jeu.

3 tailles sont définies :

- taille large avec L/D de 12 à 14
- taille moyenne avec L/D de 16 à 18
- taille menue ou étroite avec L/D variant de 25 à 30

Ces rapports ont une incidence forte sur le timbre. Les valeurs varient aussi avec la dimension du local où est situé l'orgue. Le facteur d'orgue dispose d'une large marche de manœuvre pour choisir les L/D soit à l'intérieur d'un jeu soit d'un jeu à l'autre. Nous verrons plus loin comment L/D agit sur le timbre.

#### Matériau : métal ou bois :

Les matériaux utilisés pour la fabrication des tuyaux à bouche sont nombreux et variés ; ils permettent à l'organier d'adapter le matériau en fonction des résultats acoustiques désirés. Un tuyau en bois n'a pas le même timbre qu'un tuyau en métal de même section.

**Les métaux** utilisés doivent avoir des caractéristiques spécifiques :

- référence à la tradition comme l'étain, le plomb, le cuivre ; le zinc en fait rarement partie
- être soudables avec l'étain donc à basse température et faciles à être mis en œuvre avec les équipements dont disposent les facteurs de tuyaux.

Sont recherchées des qualités parfois contradictoires :

- pour l'étain utilisé au maximum à 80/85%, le reste étant du plomb, par son esthétique visuelle, sa résistance à l'oxydation par l'humidité et la salinité de l'air, sa mise en œuvre aisée par coulage, sa bonne résistance mécanique tout en étant malléable pour faciliter le travail de l'harmoniste, sa grande aptitude à la soudure.
- pour le plomb, alliage permanent avec l'étain allant de 20 à 75% le reste étant de l'étain, on recherche

un timbre doux avec peu d'harmoniques absorbés par la densité et la faible raideur des parois. Il est moins cher que l'étain. Par contre il est lourd et sa résistance mécanique faible ce qui provoque des déformations avec fluage des pieds et des corps des tuyaux. Le plomb facile à mettre en œuvre, à souder et à déformer, est sensible à l'oxydation. Cette oxydation qui l'élimine des tuyaux de façade car elle donne un aspect mat et terne à l'extérieur, se propage aussi au niveau de la "lumière" des tuyaux (en moyenne 1mm de large) en provoquant des concrétions de sels de Pb diminuant progressivement la section de la lumière. Les sons deviennent plus doux, moins intenses ; la fréquence est aussi abaissée.

- pour le cuivre, l'esthétique visuelle particulière et originale surtout pour une façade, sa résistance élevée qui élimine tout fluage ou déformation, ses performances sonores qui se rapprochent de celle de l'étain en forte proportion. Par contre sa mise en oeuvre est difficile à cause de sa raideur : les feuilles de cuivre sont obtenues par laminage et non par coulée comme l'étain ou le plomb. Sa résistance à l'oxydation est moins bonne que l'étain sauf avec un vernis protecteur qui se ternit avec le temps.
- pour le zinc, son coût est faible et sa résistance mécanique élevée, son esthétique visuelle est décevante l'éliminant des façades; le laminage des feuilles de zinc le rapproche du cuivre pour sa mise en œuvre; acoustiquement sa raideur provoque des vibrations parasites des parois.

Les bois sont utilisés pour la réalisation des tuyaux à bouche pour leur résistance mécanique, leur coût plus faible que l'étain et pour leurs caractéristiques acoustiques. Tous les bois utilisés sont traités contre la vermine et les moisissures. Ce sont :

- des résineux en majeure partie, faciles à mettre en œuvre ; les sons sont clairs
- des feuillus à bois durs comme le chêne, l'acajou, le niangon; les sons sont lourds et amples
- des fruitiers comme le pommier, le poirier, le noyer... Leur coût élevé et la faible dimension des planches les réservent pour les tuyaux de faibles dimensions ; à leur beauté esthétique s'ajoutent des performances acoustiques originales

 des bois très durs à grain fin comme le buis, réservé aux très petits tuyaux ; très rare. Les pieds des tuyaux en bois sont aussi en bois et ajoutés au corps évitant les déformations

# Fonctionnement d'un tuyau à bouche ; loi des tuyaux

L'air sous pression, le vent, entre dans le tuyau par l'orifice situé au pied du tuyau, parcourt le pied et sort à l'extérieur par la lumière sous la forme d'un jet plat qui est une sorte de lame d'air mince et plate; cette lame traverse la bouche et vient frapper la lèvre supérieure.

En agissant à la fois avec la lèvre supérieure et la colonne d'air contenue dans le tuyau, la lame crée une oscillation stable qui fait parler le tuyau. En frappant l'arête de la lèvre supérieure elle prend une forme de coin et se sépare en 2 parties - 2 tourbillons de part et d'autre de la lèvre supérieure : une partie externe qui se mêle à l'air et qui s'atténue, et une partie interne, véritable excitateur du tuyau.

Comme l'air est compressible, le phénomène est oscillant, un peu comme un drapeau flottant au vent.

La bouche est le siège d'oscillations de pression dont la fréquence dépend des caractéristiques physiques de l'air. Elles excitent la colonne d'air contenue dans le tuyau et, lorsque les conditions de résonance sont réalisées, - fréquence d'excitation égale à la fréquence propre de la colonne d'air ou à un harmonique - il y a amplification de l'oscillation et le tuyau "parle". L'accrochage presque instantané du son n'est pas encore expliqué par les physiciens.

Le tuyau ne perle que si la colonne d'air est le siège d'ondes stationnaires c'est-à-dire que la position des nœuds et des ventres de pression le long du tuyau est stable dans le temps.

Si l'énergie de la lame est trop intense, le tourbillon interne devient si volumineux qu'il repousse les zones de pression dans le tuyau et donc raccourcit la longueur d'onde dans la colonne d'air : le tuyau donne un son plus haut d'une octave - il octavie - s'il est ouvert ou il émet le son de base une quinte au-dessus - il quintoie - s'il est fermé.

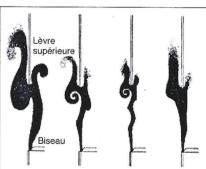
En décalant vers l'extérieur la lèvre supérieure, on privilégie le tourbillon interne et donc le niveau d'excitation de la colonne d'air : le tuyau parle avec plus d'intensité. Une lèvre supérieure trop rentrée ne permet pas au tourbillon d'atteindre un niveau d'énergie suffisant pour mettre rapidement en résonance la colonne d'air, d'où un retard à l'émission du son.

Cette lame qui produit et entretient le son dans le tuyau est de nature turbulente et non laminaire. Cet écoulement turbulent permet la stabilité et la reproductibilité du son. Un écoulement laminaire obligerait la lame, par suite de sa viscosité, à réagir avec la lèvre inférieure et les parois de la lumière; cette lame serait alors instable et non reproductible.

Notons que ce régime turbulent est recherché par l'harmoniste : s'il est insuffisant, il fait de fines encoches ou fines rayures sur l'arête du biseau ce qui a pour effet de diviser la lame d'air en minces filets fluides qui agissent entre eux. Les frottements augmentés diminuent la vitesse de la lame et donc l'intensité du son, en particulier les harmoniques.

Lorsque la lame d'air frappe la lèvre supérieure, sa vitesse a diminué proportionnellement au carré de la distance - lumière, lèvre supérieure - ou hauteur de bouche. C'est dire l'importance de ce paramètre et son influence sur le bon réglage du tuyau.

Le fonctionnement d'un tuyau à bouche a été analysé par des physiciens, des facteurs d'orgue comme Cavaillé-Coll et des essais ont montré l'allure des phénomènes vibratoires au niveau de la bouche et dans le corps du tuyau.



Vue en travers d'une bouche d'un tuyau en métal. Le vent sort par la lumière sur le côté gauche du biseau et frappe l'arête de la lèvre supérieure en provoquant des tourbillons internes et externes qui sont figurés en noir sur le 4° croquis.

En soufflant sur la bouche d'un tuyau pendant qu'il émet un son, le son disparaît instantanément car ce souffle provoque une perturbation dans les filets d'air autour de la bouche. Même si la pression du vent est forte, il suffit d'un léger souffle pour stopper le son émis.

La visualisation des filets d'air au niveau de la bouche montre que le mouvement de l'air est alternativement dirigé vers l'intérieur et l'extérieur du tuyau au niveau de la lèvre supérieure. Ce mouvement de va-etvient de la lame est sinusoïdal et de même fréquence que le son fondamental du tuyau.

La longueur du tuyau impose la fréquence du système comme nous allons le voir.

Pour que les harmoniques soient présents, on décale la lame en tirant vers soi la lèvre supérieure : cette asymétrie est indispensable pour obtenir un son ample et plein.

L'expérience montre qu'il faut augmenter cette asymétrie quand la hauteur de bouche augmente, ce qui est le cas pour les tuyaux fermés comme les **Bourdons**.

Les harmoniques du son fondamental du tuyau sont produits par l'interaction de la lame et de la lèvre supérieure lorsque l'énergie de la lame est suffisante, c'est-à-dire quand sa vitesse et son volume sont suffisants.

Si cette énergie est trop importante, le tuyau est sursaturé et les harmoniques sont prédominants. Il faut alors diminuer cette énergie par les moyens suivants:

- diminution de la vitesse en diminuant la section d'arrivée d'air au pied du tuyau ou en augmentant la hauteur de bouche
- diminution du volume de la lame en rétrécissant les bords de la lumière au niveau de la lèvre inférieure.



Vue de face d'un tuyau en métal au niveau de sa bouche. La hauteur de bouche est la distance entre 2 arêtes : celle de la lèvre supérieure et celle de la lèvre inférieure. Cette valeur est fondamentale dans l'harmonisation du tuyau car elle détermine la qualité du son : une hauteur trop faible tend à privilégier les harmoniques seuls ce aui est incorrect.

tend à privilégier les harmoniques seuls ce qui est incorrect, une hauteur trop grande peut empêcher le tuyau de parler. La détermination d'une valeur optimum dépend de plusieurs

facteurs comme la pression, la nature du tuyau : ouvert ou fermé.

Comme la vitesse de la lame dépend du carré de cette distance, une faible modification de cette distance a des effets importants sur la vitesse de la lame. Si l'on a dépassé la valeur limite, il est délicat, voire impossible de revenir à la valeur initiale. Il faut noter que le résonateur, constitué par le corps du tuyau, est relativement inerte et les actions sur lui, une fois réalisé, concernent uniquement l'accord.

Dans le résonateur, les pertes d'énergie sont dues à la viscosité de l'air ; elles augmentent quand on diminue la section et que l'on augmente la longueur c'est le cas des jeux avec L/D de 25 à 30.

A noter que les pertes croissent avec la rugosité des parois internes des tuyaux et la sinuosité de leur profil dans certains cas. Il est préférable d'avoir des tuyaux rectilignes, lisses et sans aspérités intérieures.

#### Lois de Bernoulli:

Ce physicien a étudié les relations qui existent entre la fréquence du son fondamental émis par un tuyau et sa longueur. Le tuyau à bouche imposant presque intégralement la fréquence par sa longueur on conçoit que les relations de base soient assez simples.

Pour un tuyau ouvert, les nœuds de pression se situent à la bouche, à l'extrémité et le long du tuyau, espacés de  $\mathcal{N}2$ , la condition de résonance est :

 $L = n \lambda/2 = n c/2f$ n étant le nombre de nœuds

> f = nc / 2 Lc = 340 m/s

# Le tuyau ouvert émet tous les harmoniques de rang pair et impair.

Pour un tuyau fermé, il y a toujours un ventre de pression au niveau du tampon et un nœud de pression à la bouche ; suivant les différentes valeurs de  $\lambda$ , les nœuds et les ventres augmentent.

La distance entre un nœud et un ventre de pression est  $\mathcal{N}4$ . La condition de résonance est alors :

L =  $(2n + 1) \mathcal{N}4 = (2n+1) c/4f$ d'où :

f = (2n + 1) c/4L

Le tuyau fermé émet une fréquence qui est la moitié de celle du tuyau ouvert de même longueur soit une octave en dessous ; de plus il émet des harmoniques de rang impair.

Exemple : un tuyau ouvert de  $2,4\,\mathrm{m}$  de long émet un son de  $70\,\mathrm{Hz}$  ; s'il est fermé la fréquence du son émis est de  $35\,\mathrm{Hz}.$ 

#### Commentaires:

- les lois de Bernoulli ne concernent que la fréquence, pas l'intensité ni le timbre.
- les valeurs obtenues sont des "ordres de grandeur" certes utiles mais un peu plus fortes que la réalité. Ceci semble avoir comme cause l'indétermination de la longueur exacte du tuyau en particulier où commence la bouche.
- la fréquence varie avec la température de l'air : quand la température croit, la fréquence croit; en effet on a :

$$c = c \sqrt{1 + t/273}$$
;

un son de fréquence 440 Hz à 0°C passe à 451 Hz à 14°C

 les lois s'appliquent mal aux tuyaux semi-ouverts ou semi-fermés en particulier ceux "à cheminée".

- à influence moyenne comme le choix des pressions ;
- à influence faible comme la teneur en étain.

D'autres moyens existent.

#### Fréquence

Les fréquences en fonction de la longueur des tuyaux dans un même jeu de 4,5 octaves à 5 octaves est de la forme :

#### f = k/L

Cette loi hyperbolique est valable pour les tuyaux ouverts et fermés.

La fréquence d'un tuyau à bouche, pour une longueur donnée peut être sensiblement modifiée par les actions suivantes :

- diminution de la pression au pied du tuyau par diminution de la section de

- son fondamental dominant avec émission d'harmoniques impairs doux type Flûte;
- son fondamental d'intensité moyenne avec émissions d'harmoniques impairs à l'attaque comme les dessus de Bourdon ( à partir de 128 Hz)
- son fondamental intense avec émission d'harmoniques pairs et impairs intenses : jeux de Principaux ;
- son fondamental faible avec harmoniques dominants : jeux des Gambes, des Salicionaux, des Quintatons.

#### Attaque

Si l'accrochage du son est presque instantané pour les tuyaux à partir de 1,5 m de long, il n'en est pas de même pour les tuyaux très longs où on constate un retard de quelques dixièmes de seconde voire 1 seconde pour les grands tuyaux. Ceci est dû à l'inertie de la colonne d'air contenue dans le corps du tuyau. Ce retard bien que perceptible est toléré d'autant que l'émission simultanée de fréquences plus élevées provoque le départ des tuyaux émettant des fréquences basses.

Les 4 caractéristiques acoustiques du tuyau sont inter-dépendantes : il n'est pas possible de les isoler, d'agir sur l'une sans modifier les autres, ce qui rend le travail de l'harmoniste délicat et long.

Les 4 caractéristiques sur chaque tuyau sont à généraliser sur l'ensemble de chaque jeu soit sur 56 à 61 tuyaux de la même famille, tout en insérant des petites différences qui donnent la vie aux sons.

# Paramètres de construction d'un tuyau à bouche

Les caractéristiques d'intensité et de timbre d'un tuyau d'orgue à bouche sont en grande partie déterminées par un choix de paramètres particuliers. Un son de Prestant ou de Montre de la catégorie des Principaux, ne peut pas être obtenu avec des tuyaux fermés qui donnent des sons doux.

# Matériau : rigidité, rugosité, épaisseur

La rigidité est l'inverse de la flexibilité. Quel que soit le matériau utilisé pour la réalisation des tuyaux, il doit être rigide, ses déformations doivent être négligeables dans toutes ses directions. Un tuyau en tissu tendu rendu étanche n'émet pas de son. En effet,





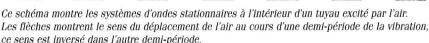












Les 4 images de gauche montrent ce qui se passe dans un tuyau ouvert avec un ventre à l'extrémité du tuyau et un fondamental pour le schéma 1, et les différents harmoniques pairs pour les autres schémas.

Les 3 images de droite montrent un tuyau fermé avec un nœud à l'extrémité du tuyau. Le premier schéma montre l'allure fondamentale et les 2 autres, les harmoniques, toujours un multiple impair du fondamental.

## Caractéristiques acoustiques recherchées dans un tuyau à bouche

L'orgue utilisant un tuyau pour chaque son et chaque tuyau ne donnant en général qu'un son, chaque tuyau va devoir être réglé par l'harmoniste pour obtenir les caractéristiques suivantes:

- l'intensité
- la fréquence
- le timbre
- l'attaque

#### Intensité

L'harmoniste, le facteur d'orgue disposent pour obtenir les diverses intensités d'un orgue de nombreux moyens :

 à influence forte liés aux choix des familles de tuyaux : ouverts, semiouverts, fermés;

- passage du vent ; la fréquence diminue quand la pression baisse,
- diminution de la section de passage au niveau de la lumière : même chose que la pression,
- présence d'oreilles de part et d'autre de la lumière ce qui diminue la vitesse et la fréquence,
- présence d'un frein de bouche : même effet de baisse de la fréquence.

#### **Timbre**

Les timbres qu'il est possible d'obtenir avec des tuyaux à bouche peuvent se classer en 5 catégories :

- son fondamental presque seul comme les jeux avec tuyaux fermés dans les basses (16 à 128 Hz) et certaines harmoniques impairs en jeux séparés comme la Tierce par exemple ;

un tuyau à bouche est le siège de 2 fréquences propres :

- celle donnée par la colonne d'air qui génère le son de base du tuyau,
- celle donnée par les parois du tuyau vibrant sous les sollicitations de la colonne d'air et qui se mélange à la fréquence du son de base.

Ce rapport est important car il amplifie ou étouffe le son. L'amplification a lieu quand les 2 fréquences sont proches ; il peut même se produire une résonance quand les 2 fréquences sont égales. L'intensité du son émis alors augmente. Nous connaissons l'expérience du verre qui éclate quand la fréquence du son émis égale la fréquence propre des parois du verre.

La fréquence propre de vibration d'un solide est :  $f = 0.5 \sqrt{k/I}$ 

Où f est la fréquence en hertz, k le coefficient d'élasticité, sa force de rappel et I son inertie.

Le calcul de la fréquence propre des parois d'un tuyau est complexe car les déformations aux nœuds sont nulles et sont maximales aux ventres.

Pour une section donnée, I croît avec la densité ou la masse spécifique.

La force d'élasticité croît avec la valeur du module.

La fréquence propre d'un corps de tuyau à bouche augmente avec le module d'élasticité du matériau et diminue avec sa densité.

Plus on "rigidifie" le corps d'un tuyau, plus on utilise un matériau à fort module, et plus sa fréquence propre augmente, plus son action sur l'émission d'harmoniques sera forte. Par contre il sera neutre pour le son de base, le son fondamental. Si la rigidité est trop grande, la fréquence propre dépasse alors celle de la colonne d'air et le tuyau "zingue", le son émis par les vibrations des parois perturbe le son du tuyau.

Quand on augmente l'inertie du corps du tuyau en utilisant des matériaux de densité élevée ou en augmentant l'épaisseur des parois, il y a amortissement des vibrations et la fréquence propre diminue.

Les harmoniques – fréquences plus élevées que le son de base soit de multiples pairs (2,4,8 ce sont les octaves) soit de multiples impairs (1,25 ou 1,5 que sont les tierces et les quintes) – peu chargés en puissance sont atténués ce qui fait émerger davantage le son fondamental.

	Alu	Bois	Plomb	Etain	Cuivre	Zinc
Modules d'élasticité	7500	1200	500	3200	11000	9500
Densités	2,7	0,6	11,3	7,2*	8,9	7,1
Rigidités relatives	2778	2000	441	438	1230	1338

<sup>\*</sup> La densité des alliages étain-plomb utilisés pour les tuyaux d'orgue est très variable suivant la teneur en plomb.

Ce tableau permet les constatations suivantes :

- les rigidités relatives du plomb et de l'étain sont proches ; idem pour le cuivre et le zinc.
- La densité du bois est faible et peutêtre compensée par une plus forte épaisseur.

Comme le module d'élasticité de l'étain est faible, un moyen pour l'augmenter consiste à l'écrouir par un martelage ponctuel avec un marteau à bout rond. Cet écrouissage tend en fait à transformer la structure coulée en structure forgée. La raideur dans le sens de l'épaisseur croît, ce qui tend à favoriser les harmoniques; en même temps, on augmente la rugosité interne des parois ce qui tend à augmenter les frottements de ces harmoniques.

Le gain indiscutable du martelage est sa meilleure résistance au fluage.

En diminuant la rigidité des parois, la fréquence propre diminue et les harmoniques amortis laissent place au son fondamental.

On augmente la rigidité des parois en utilisant des matériaux à module d'élasticité élevé et des densités faibles.

Le matériau "idéal" serait alors le verre avec des parois minces. Le métal qui s'en rapproche est l'aluminium, ou du moins ses alliages. On ne l'utilise pas en facture de tuyaux à cause des difficultés de soudage et sa raideur pour rouler les feuilles et les couper avant soudage.

Au total, les matériaux utilisés pour fabriquer les tuyaux à bouche influent sensiblement sur les timbres des sons.

Les alliages étain-plomb le plus souvent utilisés pour leur facilité d'élaboration, de mise en œuvre, de soudure et de malléabilité, permettent d'obtenir :

 des sons intenses avec présence d'harmoniques intenses associés à un fondamental intense quand le pourcentage d'étain est élevé. On

- obtient les mêmes résultats avec le cuivre.
- des sons avec un fondamental doux et des harmoniques atténués avec une teneur en plomb élevée.

#### Rugosité:

Il s'agit de la rugosité des parois internes des tuyaux. Des parois ru-gueuses tendent à freiner l'amplitudes des ondes stationnaires et donc à affaiblir celles qui contiennent le moins d'énergie que sont les harmoniques.

Si l'on souhaite des sons doux avec des harmoniques peu intenses, il est préférable de laisser les parois internes "brutes" de coulée.

Pour les tuyaux des Principaux où sont recherchés des harmoniques intenses, il est préférable de raboter la partie interne des tuyaux avant façonnage.

#### **Epaisseur:**

Dans la majorité des tuyaux en métal ou en bois, les épaisseurs sont constantes sur un même tuyau. L'épaisseur croît avec le diamètre et la longueur

Il y a une épaisseur minimale à respecter pour obtenir une rigidité acceptable et l'absence de déformations et de fluages. Les facteurs de tuyaux connaissent les seuils à utiliser.

Augmenter l'épaisseur des parois revient à augmenter son inertie donc sa densité relative : un tuyau avec des parois trop épaisses est certes plus rigide mais il absorbe davantage les harmoniques.

Les épaisseurs utilisées pour les tuyaux en bois sont beaucoup plus grandes que celles en métal : il s'ensuit une nette différence de timbre. De plus l'épaisseur au moins 10 fois plus grande de la lèvre inférieure tend à freiner le vent et à donner un timbre plus doux, plus moelleux. Cette forte épaisseur est équivalente à un frein de bouche.

# Formes des parois, du pied, de la bouche :

#### - formes des parois

Le corps du tuyau étant un résonateur, sa forme va influencer son efficacité.

Nous avons vu que pour les tuyaux en métal le nombre de formes diverses le plus souvent utilisées est de 3 :

- cylindrique, le plus fréquent ; les parois sont parallèles
- conique convergent où le diamètre au niveau de la bouche est plus grand qu'à l'extrémité
- cylindro-conique avec une partie audessus de la bouche cylindrique qui se prolonge par une partie conique convergente

Toutes les sections des tuyaux en métal sont circulaires.

Les formes coniques convergentes tendent à se rapprocher des tuyaux "à cheminée" et le son obtenu est intermédiaire entre les tuyaux cylindriques ouverts et les tuyaux fermés.

Pour les tuyaux en bois les sections sont généralement rectangulaires et parfois carrées. Dans ces tuyaux, les 4 coins internes tendent à freiner la colonne d'air et donc à absorber les harmoniques. Les tuyaux en bois ont le plus souvent un son plus doux que leurs congénères en métal.

Pour des contraintes d'encombrement en hauteur, certains tuyaux en métal comme en bois sont coudés. Pour que le cheminement des ondes stationnaires ne soit pas trop perturbé, il est judicieux d'effectuer des coudes progressifs en évitant les coudes simplistes à 45°. La distance du premier coude doit être vers le 2/3 de la longueur du tuyau.

#### - formes du pied

Pour les tuyaux en métal, la forme du pied est déterminée plus par des facilités de réalisation et de choix esthétiques qu'à une recherche d'optimisation de la circulation du vent. Le volume important qui est contenu par le pied est favorable à l'établissement du son sans brutalité, ce volume tampon agissant comme un ralentisseur. Pour les tuyaux en bois, les pieds sont optimisés par leur longueur, leur diamètre et l'existence d'un clapet de réglage permettant d'agir sur la section de passage donc de régler l'intensité.

#### - formes de la bouche

La construction de la bouche revient avant tout à définir la longueur du biseau et donc de la lumière. L'énergie de la lame d'air qui sort de la lumière est, à pression constante, proportionnelle à la surface de la lumière donc au produit de sa longueur par sa largeur. Pour des sons que l'on désire intenses comme les Principaux, il faut choisir des lumières longues ; inversement pour des sons que l'on désire doux comme les Flûtes, les lumières doivent être de longueur réduite.

Les valeurs le plus souvent utilisées sont : les suivantes avec L = longueur de bouche ou de lumière et  $\pi$  D la circonférence du tuyau de diamètre D :

- Principaux, Gambes L =  $\pi D/4$
- Flûtes ouvertes L = de  $\pi D/5$  à  $\pi D/6$

Pour les tuyaux en bois de section rectangulaire le plus souvent, si P est la profondeur interne du tuyau et L sa largeur, L = 0,6 à 0,8 pour les Principaux et 0,6 pour les Flûtes.

#### Longueur du tuyau

Elle est théoriquement définie par la formule de Bernoulli avec des coefficients de correction bien connus car les formules donnent des longueurs un peu trop grandes. La difficulté provient de l'indétermination de la longueur réelle à prendre en compte : où commence la longueur, à l'arête de la lumière, au fond du biseau, à la lèvre supérieure ?

En ce qui concerne la loi générale des tuyaux,  $\mathbf{L} = \mathbf{k}/\mathbf{f}$ , f étant la fréquence, elle signifie que la fréquence donnée par un tuyau à bouche est inversement proportionnelle à sa longueur. Si cette loi est peu spectaculaire pour les petits tuyaux et donc les fréquences élevées, elle est redoutable dans ses conséquences pour les basses fréquences.

Exemple: Le tuyau du DO1 sur un Principal de 8' mesure 2,5 m de haut pour une fréquence de 64 Hz; pour le DO 1 d'un Principal de 16' cette hauteur est de 5 m avec une fréquence de 32 Hz; pour le DO1 d'un Principal de 32', la hauteur est de 11 m avec le pied et la fréquence est de 16 Hz!

## - Relation longueurs /diamètres

Cette relation déjà signalée comporte 2 aspects :

- rapport L/D différent d'un jeu par rapport à un autre,
- rapport L/D différent à l'intérieur d'un jeu.

# 1 - L/D différent d'un jeu par rapport à un autre :

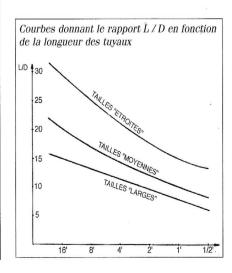
3 rapports ou "tailles" existent et sont normalement utilisés dans la détermination des diamètres des tuyaux. Ces valeurs sont le résultat de nombreux essais empiriques effectués par les facteurs de tuyaux.

- tailles larges, L/D varie de 12 à 14 dans les basses. Le diamètre du tuyau est grand par rapport à sa longueur ce qui permet au son fondamental de prendre une large amplitude. Par contre les harmoniques sont absorbés. Ce rapport est utilisé pour les jeux de type Flûte : son ample et doux.
- tailles moyennes, L/D se situe vers 16. Le fondamental et les harmoniques sont intenses. Les sons vigoureux et clairs sont utilisés pour les Principaux et le Plein-jeu.
- tailles étroites, L/D varie dans les basses de 24 à 30. la faible section du tuyau ne permet plus au fondamental de prendre une amplitude forte par contre les harmoniques deviennent prépondérants.

Le timbre obtenu se rapproche de celui des instruments à corde de l'orchestre comme les violons et les violoncelles avec fondamental faible et harmoniques intenses en particulier la Tierce. Les sons ténus sont riches. Utilisation dans les jeux gambés et les cymbales.

La visualisation des ces 3 tailles se trouve dans les courbes ci-dessous.

Elles sont la synthèse de patientes observations et ont une grande importance dans l'acoustique des tuyaux à bouche.



Rapports L/D sur les tuyaux à bouche ouverts							
Hauteurs en pied	16'	8'	4'	2'	1'	1/2'	
Longueurs en mm	4800	2400	1200	600	300	150	
Taille large						•	
Diamètres	320	190	113	67	40	24	
Rapport L/D	15	12,6	10,6	8,9	7,5	6,3	
Taille moyenne							
Diamètres	244	145	85	50	30	18	
Rapport L/D	20	16,6	14	12	10	8,3	
Taille menue							
Diamètres	160	95	57	34	20	12	
Rapport L/D	30	25	21	18	15	12,6	

Le tableau des valeurs L/D les plus souvent utilisées complète les trois courbes.

# 2 - L/D différent à l'intérieur d'un jeu :

Pour obtenir un timbre homogène sur toute l'étendue des 56 à 60 tuyaux d'un jeu soit sur environ 5 octaves, il faut définir un rapport L/D adéquat. La détermination de ce rapport est délicate car si on prend une valeur donnée il y a risque d'avoir des tuyaux dans les basses ayant des diamètres trop grands ou inversement des diamètres de tuyaux trop petits dans les aigus.

Le physicien allemand Töepfer a calculé un rapport L/D qui est un compromis réaliste. Connaissant le diamètre du tuyau le plus grave d'un jeu, on obtient le diamètre du tuyau situé à une octave au-dessus (soit 12 tuyaux), en multipliant ce chiffre par le nombre de Töepfler soit

#### $1/8^{1/4} = 0.5946$

Pour obtenir les diamètres des tuyaux à l'intérieur d'une octave qui comporte 12 demi-tons, on aura :

#### $0, 5946^{1/12} = 0,9576$

Par exemple si le DO1 est de 150 mm, le DO#1 aura un diamètre de  $150 \times 0.9576$  soit 143.6 mm.

Inversement si l'on connaît le diamètre d'un tuyau et que l'on veuille le diamètre de celui situé un demi-ton plus bas on multiplie ce diamètre par l'inverse de 0,9576 soit 1,044.

En posant  $1,044^n = 2$  puisque 2 est la valeur de l'octave, on a :

n = log 2 / log 1,044soit n = 16

## Dans un jeu de tuyaux à bouche, le diamètre d'un tuyau double tous les 16 tuyaux

En fait le nombre de Töepfler est une bonne base mais les facteurs d'orgue le modifient pour tenir compte de certaines exigences ou souhaits.

Chaque jeu a sa courbe caractéristique ce qui constitue le "secret" de l'organier.

Des évolutions ont eu lieu aussi comme le jeu de Principal appelé Montre 8'.

Au 18<sup>ème</sup> siècle, avec Clicquot, Dom Bedos, Isnard, les Montres sont douces et un peu gambées, fines et insinuantes ce qui autorise des tailles réduites.

Inversement au 19ème siècle avec Cavaillé-Coll, la Montre très ample très envahissante qui doit compenser l'absence ou le faible nombre de mutations, est de très grosse taille.

Une fois encore, les organiers tiennent plus compte des réalités acoustiques et musicales que de la régularité d'une courbe mathématique.

Dans tous les cas, l'allure de la courbe même modifiée est de forme hyperbolique.

# Accessoires du tuyau à bouche : frein, oreilles, tampons, dispositifs d'accord

#### - frein

Il s'agit d'une pièce en bois ou en métal de forme arrondie que l'harmoniste place devant la bouche du tuyau pour obtenir certains effets ou éliminer des défauts. De nombreux moyens sont possibles pour fixer le frein ; il est préférable qu'il soit réglable et solidement fixé.



Cette photo montre un jeu de tuyaux en bois sur lesquels un ouvrier pose des freins devant la bouche.

Le frein est constitué dans ce cas d'un rouleau en bois avec 2 petits axes aux extrémités qui viennent se placer dans une rainure située de part et d'autre de la bouche La longueur du rouleau est celle de la bouche.

Ce système n'est pas facilement réglable par l'harmoniste.

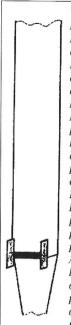
Le frein de bouche est un ralentisseur de la vitesse de la lame d'air sortant de la lumière et aussi un orienteur de la lame vers la lèvre supérieure.

L'utilisation d'un frein s'effectue dans les principaux cas suivants :

- tuyaux ouverts ou fermés ayant des longueurs de bouche importantes comme les basses des Bourdons ou des Soubasses. La lame d'air très large est instable et le frein stabilise la lame en vitesse et en direction;
- tuyaux de menue taille comme les Gambes ou les Quintatons ; l'effet recherché est de faire entendre des harmoniques avec une intensité particulière. L'obtention rapide et stable de cet effet nécessite une orientation précise de la lame d'air et une diminution de sa vitesse par le frein.

Retenons qu'un frein de bouche a plusieurs actions :

- diminuer la vitesse de la lame d'air sortant de la lumière ; le son devient moins intense mais plus stable,
- stabiliser la lame d'air en amplitude,
- orienter la lame d'air vers la lèvre supérieure,
- ajuster avec précision la fin de l'accord du tuyau sachant la corrélation entre la fréquence et l'intensité.



Vue d'un tuyau à bouche en métal équipé de 2 oreilles latérales soudées de part et d'autre de la bouche. La position des oreilles doit être telle que le milieu des oreilles soit au centre de la hauteur de bouche. La profondeur des oreilles peut être très variable : pour les tuyaux à large bouche comme les Bourdons, la profondeur est importante et égale à la hauteur de bouche. Pour les tuvaux de facade où les oreilles sont mises surtout pour parfaire l'accord, la profondeur des oreilles est plus faible.

A la stabilité de la lame d'air, les oreilles apportent aussi un effet directionnel du son et la possibilité de parfaire l'accord du tuyau en écartant ou en rapprochant les oreilles.

#### - oreilles

Il s'agit de petites feuilles de métal qui sont soudées de part et d'autre de la bouche. Leur hauteur est au moins le double de la hauteur de bouche.

Elles ont plusieurs fonctions :

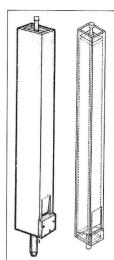
- freiner la lame en la stabilisant ce qui diminue sa vitesse, diminue la fréquence et diminue l'intensité,
- permettre de parfaire l'accord du tuyau en écartant ou en rapprochant les oreilles légèrement.

Les oreilles, comme le frein de bouche, tendent à modifier le rapport L/D puisque pour une fréquence donnée, il faut diminuer la longueur du tuyau. Les oreilles, comme le frein de bouche, tendent par le freinage de la vitesse de la lame à diminuer la force des harmoniques. C'est pourquoi il est préférable de ne pas trop en poser sur les principaux.

#### - tampons et calottes

Ces pièces servent à obturer l'extrémité du tuyau dans le cas des tuyaux bouchés ou à cheminée, en bois ou en métal.

Le problème des tampons en bois ou en métal est d'assurer l'étanchéité tout en permettant, dans la majorité des cas; la possibilité d'être mobile pour parfaire l'accord; sur les petits tuyaux le problème est simple et contrôlable facilement; sur un tuyau de Soubasse de 2,5 m de long et dont les côtés font 250 x 200 mm, il subsiste une incertitude!



Vues d'un tuyau en bois, fermé, tuyau de Bourdon ou de Souhasse La vue de gauche montre un tuvau en vue extérieure et celle de droite, le même tuyau en coupe, en écorché. A la partie supérieure on apercoit le tampon en bois inséré dans l'intérieur du tuvau. Comme la majorité des tuyaux en bois. leur section est carrée ou rectangu-

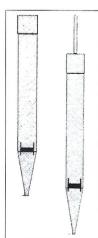
laire ce qui nécessite des précautions pour assurer l'étanchéité et un bon coulissement. A la partie supérieure du tampon est fixé un manchon en bois qui permet sa mobilité. A noter que, pour les tuyaux en bois, le tampon coulisse dans l'intérieur du tuyau.

Il faut noter que les tampons en métal viennent coiffer le diamètre extérieur du tuyau en métal alors que les tampons en bois sont enfoncés dans la section intérieure du tuyau en bois

## - dispositifs d'accord

Les schémas ci-dessous montrent 2 tuyaux en métal, à gauche un Bourdon et à droite une Flûte à cheminée. Ces 2 types de tuyaux sont munis d'une calotte en métal, que l'harmoniste peut faire coulisser pour faire l'accord. Ces tuyaux étant munis d'oreilles latérales, l'accord peut être affiné en agissant sur elles.

Chaque tuyau d'orgue doit être accordé et pouvoir à tout moment l'être. L'harmoniste doit pouvoir accéder à tous les tuyaux pour ajuster la fréquence. Si des accessoires permettent d'ajuster la fréquence comme le frein ou les oreilles, ce sont des adjuvants; l'action principale pour accorder un tuyau consiste à agir sur sa longueur.



Les schémas ci-contre montrent 2 tuyaux en métal, à gauche un Bourdon et à droite une Flûte à cheminée. Ces 2 types de tuyaux sont munis d'une calotte en métal, que l'harmoniste peut faire coulisser pour faire l'accord. Ces tuyaux étant munis d'oreilles latérales, l'accord peut être affiné en agissant sur elles.

# 1 - Tuyaux fermés en métal ou en bois

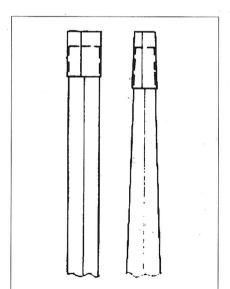
L'accord principal s'effectue en enfonçant le tampon ce qui a pour effet de diminuer la longueur : la fréquence augmente. C'est l'inverse si l'on désire baisser la fréquence.

Pour affiner le réglage, on agit sur l'écartement des oreilles dans le cas des tuyaux en bois.

## 2 - Tuyaux ouverts en métal

Il y a 3 possibilités:

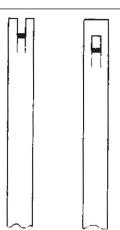
- les tuyaux "coupés au ton", où l'harmoniste par actions successives coupe le tuyau, au départ plus long que nécessaire, et l'amène à son exacte longueur. En fait le réglage final d'effectuera avec un outil spécial appelé accordoir. Ce dispositif est adapté depuis les tuyaux ouverts de 2' de long soit 65 cm jusqu'aux plus petits.
- les tuyaux comportent à leur extrémité un petit tube de presque même diamètre que le tuyau, qui peut coulisser à frottement doux comme un tampon. En enfonçant le tube, on raccourcit le tuyau et la fréquence augmente.



Dispositif d'accord pour des tuyaux en métal constitué d'un tube en métal qui peut coulisser à frottement ferme sur l'extérieur du tuyau au niveau de son extrémité. Il est applicable aux tuyaux cylindriques et coniques convergents.
En fait, on augmente ou on diminue la lengueur du tuyaux pour obtenir con accord.

longueur du tuyau pour obtenir son accord.
Comme les tuyaux coupés "au ton", ce
dispositif est très précis et permet d'avoir
un son de fréquence nette et précise.
Ce système est analogue à la calotte des
tuyaux fermés, eux-aussi, coupés au ton.

- Les tuyaux sont plus longs que nécessaire et comportent à l'arrière une encoche qui part soit de l'extrémité du tuyau soit en dessous de l'extrémité (voir croquis). En enroulant le bord de la languette dans l'encoche, on tend, là encore, à diminuer la longueur du tuyau et à augmenter la fréquence.



Ce dispositif est une variante du précédent. Ce système, adaptable à tous les tuyaux à bouche ouverts ou semi-ouverts, consiste à laisser une sur-longueur au tuyau, égale à 2 fois le diamètre, environ, et de faire une encoche qui part au-dessous de l'extrémité, à environ une valeur égale au diamètre. Ce système, généralisé sur les orgues romantiques et symphoniques a l'avantage d'être pratique et précis et d'augmenter l'intensité du son puisque la partie située au-dessus de l'encoche est active ; par contre ce système introduit une incertitude quant à la longueur exacte du tuyau amenant un son avec une fréquence moins nette que sur les tuyaux coupés au ton.

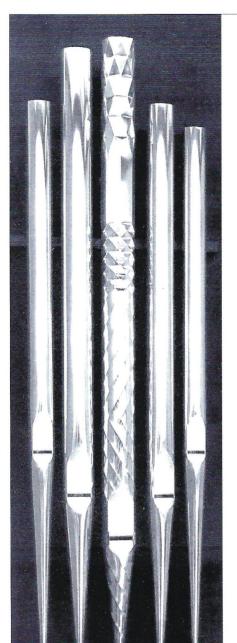
#### 3 - Tuyaux ouverts en bois

Vue d'un tuyau ouvert en bois montrant à partir du bas :

- le pied muni d'un dispositif de réglage de débit, donc de pression
- la lèvre supérieure, assez épaisse et tenue par 3 vis
- la lèvre supérieure dégageant une bouche de faible hauteur puisque le tuyau est ouvert
- le corps du tuyau de section rectangulaire
- le dispositif pour l'accord en haut à droite, constitué d'une

plaque en bois qui peut coulisser sur une rainure usinée dans le tuyau : en baissant la plaque d'accord la fréquence du son augmente, elle diminue quand on remonte la plaque.

De tels tuyaux comportent sur la face avant ou arrière une plaque en bois qui peut coulisser sur une rainure faite sur la paroi du tuyau. En baissant cette plaque on raccourcit la longueur du tuyau et on augmente la fréquence.



Ensemble de 5 tuyaux de façade signés Laukhuff.

Ces tuyaux de Prestant 4' sont réalisés dans un alliage d'environ 80% d'étain ce qui donne un aspect magnifique à ces tuyaux, avec des reflets or caractéristiques de la pureté de cet alliage.

Le tuyau du centre est gaufré : la feuille après la découpe du corps du tuyau est passée dans un laminoir ayant cette forme. Les bouches sont revêtues d'une feuille d'or très fine collée.

Sur le tuyau central, on aperçoit 2 petites oreilles latérales qui servent à peaufiner l'accord.

Ce magnifique exemple de tuyaux montre à l'évidence que la facture d'orgue est un des domaines où l'aspect extérieur a une immense valeur et que cette activité est toujours associée à l'art.

On peut imaginer une façade de buffet d'orgue avec 50 tuyaux de cette beauté.

Cet article, ainsi que celui paru dans le N°58 d'Auvergne-Sciences et ceux à paraître, sont extraits de l'ouvrage intitulé "Une nouvelle approche de

l'orgue" réalisé par Henri Bouffard où il aborde l'orgue sous les trois aspects suivants :

- Le regard du scientifique qui cherche à comprendre et expliquer les différentes fonctions de l'instrument,
- Celui du facteur d'orgue qui conçoit et réalise.
- Celui de l'organiste qui utilise.

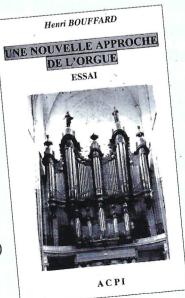
Ouvrage disponible auprès de la Librairie Nouvelle,

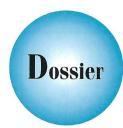
Librairie religieuse (Tél. : 04 73 90 94 23), la librairie Les Volcans (Tél. : 04 73 43 66 75)

à Clermont-Ferrand,

ou auprès de l'auteur :

Henri Bouffard (Tél.: 04 73 36 47 72).





# Bilan et perspective du développement de l'énergie éolienne en France en 2003

# Par Bernard Chabot

Expert Senior ADEME Département Energies Renouvelables

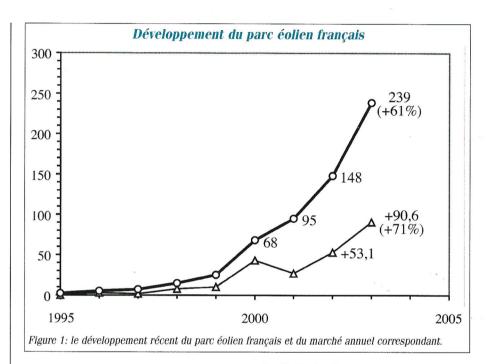
Comme l'année précédente [1] cette étude fait le bilan du développement du parc éolien en France à la fin de l'année, détaille les caractéristiques et les performances de ce parc et propose quelques conclusions quant aux perspectives de croissance de cette filière en France, notamment dans le cadre de son développement en Europe et dans le monde.

La plupart des données statistiques sont issues du système de suivi mis en place et exploité à la demande de l'ADEME et avec son soutien par les sociétés TEXYS et MEDSYS et consultable sur le site www.suivi-eolien.com.

# Le développement du parc éolien français en 2003

Avec 239 MW installés en France (métropole et DOM-TOM) en fin 2003 et comme on le voit sur la figure 1, la croissance du parc éolien opérationnel en 2003 a été de 61% sur un an au lieu de 56% en 2002.

Dans l'absolu, cette croissance a été de seulement 90,6 MW : si ce score représente 71% de plus que les 53 MW installés en 2002, il reste néanmoins en deçà des attentes et des estimations du développement du marché éolien national faites il y a seulement un an.



De plus ces données sont à relativiser compte tenu du développement toujours très rapide de l'éolien dans le monde et surtout en Europe. On se reportera pour ces comparaisons au § 3 ci-après. On notera pour l'instant que le ratio de puissance installée est en France de 4 W/habitant, soit 150 fois moins qu'au Danemark (environ 3100 MW pour 5,3 millions d'habitants, soit 585 W/habitant) ou 43 fois moins qu'en Allemagne (environ 14000 MW pour 82 millions d'habitants, soit 170 W/habitant).

# Les caractéristiques détaillées du parc

#### 2.1 Répartition régionale

#### 2.1.1 Répartition métropole/ DOM-TOM

Le tableau 1 ci-dessous résume la répartition des 481 éoliennes du parc opérationnel en fin 2003 entre la métropole et les DOM-TOM. Alors que

Tableau 1 : répartition des machines du parc en fin 2003 entre la métropole et les DOM-TOM

Total	239,05	481	0,50	100%	100%
DOM-TOM	25,26	235	0,11	10,6%	49%
Métropole	213,79	246	0,87	89,4%	51%
Régions	P MW	n	Pu MW	%P	%n

Tableau 2 : répartition des machines installées en 2003 entre la métropole et les DOM-TOM

Régions	P MW	n	Pu MW	%P	%n
Métropole	82,48	67	1,23	91%	64%
DOM-TOM	8,14	37	0,22	9%	36%
Total	90,62	104	0,87	100%	100%

la répartition des machines est à peu près égale entre la métropole et les DOM-TOM, celles installées dans ces dernières zones ne représentent que moins de 11% de la puissance du parc, celles installées en métropole en représentant presque 90%. Ceci est dû au fait de la prépondérance en DOM-TOM des machines de petite puissance rabattables en cas d'alerte cyclonique (technologie VERGNET), ce qui mène à une puissance moyenne des machines de 110 kW en DOM-TOM au lieu de 870 kW en métropole.

En ce qui concerne la répartition des 104 machines installées en 2003, on voit dans le tableau 2 ci-dessus qu'environ deux machines sur trois ont été installées en métropole et qu'elles représentent avec leur puissance moyenne de 1,23 MW plus de 90% des 90.6 MW installés en 2003, alors que celles installées en DOM-TOM ne représentent que 9% de la puissance du fait de leur puissance movenne de 220 kW. On constate donc comme dans les autres pays une croissance notable d'une année sur l'autre des puissances moyennes des aérogénérateurs installés.

#### 2.1.2 Répartition régionale détaillée

La figure 2 ci-contre détaille la répartition géographique des 239 MW du parc opérationnel en fin 2003. On constate la prépondérance régions où le développement éolien a commencé le plus tôt, notamment la région Languedoc-Roussillon qui accueille 44% de la puissance installée (43% en fin 2002). Environ trois quarts de la puissance est répartie entre seulement 5 régions. Les régions "insulaires" (Corse et DOM-TOM) représentent 15% de la puissance totale. Au total 14 régions accueillent déjà des aérogénérateurs, ce qui commence à traduire la possibilité de diversification des implantations du fait du système tarifaire modulé en fonction de la qualité des sites mis en place en 2001.

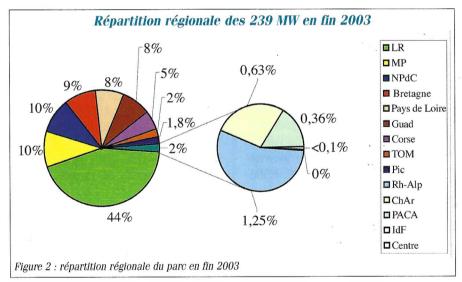
La figure 3 ci-dessous détaille la répartition géographique des 90 MW installés en 2003 dans huit régions : on retrouve la prépondérance du Languedoc-Roussillon avec 45% de la puissance totale, suivi par le Nord-Pas de Calais (13%) et la Guadeloupe (9%).

# 2.2 Caractéristiques techniques du parc

Le tableau 3 en page suivante indique la répartition du parc en fin 2003 par classe de diamètres de machines, pour lesquelles sont indiquées les puissances minimales et maximales des machines concernées, leur nombre et leur puissance moyenne. La plus grande éolienne a été installée en septembre 2003 par TOTAL dans son parc de 12 MW à Mardyck dans le département du Nord: il s'agit d'un modèle General Electric Wind Energy de 104 mètres de diamètre.

On remarque dans ce tableau que les machines de 1.5 à 2.5 MW représentent environ 20% de la puissance installée alors qu'elles ne comptent que pour moins de 5% du nombre de machines. Cette tendance au renforcement de la contribution en puissance et en énergie de cette classe de machines se renforcera dans le futur car elle est maintenant la plus utilisée en Europe. A l'autre extrémité du spectre de puissance, les machines de moins de 400 kW, malgré leur nombre important (55% du parc), ne représentent que 14% de la puissance installée.

Les aérogénérateurs installés en 2003 utilisent majoritairement des génératrices asynchrones (généralement à vitesse variable pour les grandes puissances), mais on note que la part de



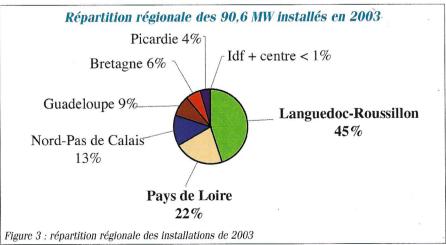


Tableau 3 : Répartition des machines par classe de diamètre

Classe de diamètre	Pmin MW	Pmax MW	n machines	P MW	Pu moyenne kW	%n	%P	Cumul %n %	Cumul %P %
D > 90  m	3	3	1	3	3000	0,2%	1,3%	0,2%	1,3%
64 < D < 90 m	1,5	2,5	21	44,5	2119	4,4%	18,6%	4,6%	19,9%
45 < D < 64 m	0,066	1,3	132	120,8	915	27,4%	50,5%	32%	70,4%
32 < D < 45  m	0,40	0,75	62	38,1	615	12,9%	15,9%	44,9%	86,3%
D < 32 m	0,02	0,30	265	32,7	123	55,1%	13,7%	100%	100%
TOTAL	min: 0,02	max : 3	481	239,1	497	100%	100%		

marché 2003 des constructeurs proposant des machines à génératrices synchrones à vitesse variable et à attaque directe (JEUMONT et ENER-CON) s'élève à plus de 18% avec au total 16,5 MW installés.

## 2.3 Parts de marché des constructeurs d'aérogénérateurs

La figure 4 ci-dessous indique les parts du marché des 90,6 MW installés en 2003 par constructeurs des machines. La part la plus importante (36%) a été prise par NORDEX, qui avec 73% des 53 MW installés en 2002 était déjà le premier fournisseur du marché Français tout comme en 2001. GAMESA (17%) et VESTAS (16%), maintenant sociétés indépendantes tant au point de vue juridique que technologique font quasiment jeu égal en deuxième et troisième place. Les constructeurs Français JEUMONT (15%) et VERGNET (9%) augmentent sensiblement leur contribution cumulée avec au total à 24% du marché 2003 au lieu de 12,4% en 2002. Enfin on notera les premières apparitions sur le marché national de deux constructeurs dans le peloton de tête mondial. ENERCON avec deux machi-

Répartition régionale des 90,6 MW installés en 2003 Enercon GE Wind 4% 3% Vergnet Nordex 9% Jeumont 15% Vestas Gamesa 16% 17% Figure 4 : répartition des parts de marché des constructeurs d'aérogénérateurs en 2003

nes de 2 MW et GENERAL ELECTRIC WIND ENERGY avec une machine de 3 MW qui comme on l'a déjà indiqué est la plus puissante actuellement installée en France.

En ce qui concerne les parts de marché cumulées, le tableau 4 ci-dessous récapitule les puissances et les parts de chacun des constructeurs qui ont installé des machines encore opérationnelles en France respectivement en fin 2002 et en fin 2003 ainsi que l'évolution en points de parts de marché entre ces deux années.

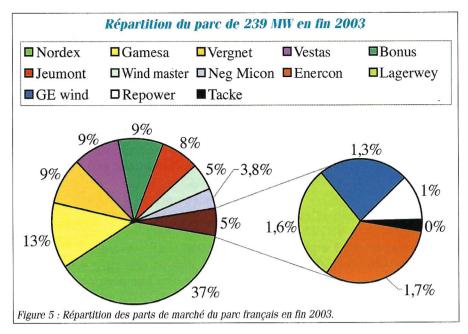
Ces variations de parts de marché cumulé entre fin 2002 et fin 2003 sont à manier avec précaution compte tenu du fait que le marché français est encore jeune et surtout beaucoup plus étroit que notamment ceux d'Allemagne et d'Espagne : ces deux pays devraient représenter un parc cumulé de plus de 19000 MW en fin 2003 soit 80 fois le parc Français. Cependant cette différence due au démarrage tardif de l'utilisation de l'énergie éolienne en France ne doit

pas oblitérer le fait de plus en plus reconnu que le marché français sera d'ici 2010 le troisième ou le quatrième marché éolien en Europe. Ainsi, dans sa révision à 75 GW de son estimation du parc éolien en Europe en 2010 [2], l'EWEA (European Wind Energy Association) estime que sur les quelques 62 GW d'aérogénérateurs à installer entre 2001 et 2010, la France avec plus de 9% de cet accroissement serait au coude à coude avec la Grande-Bretagne derrière l'Allemagne (35%) et l'Espagne (20%).

La figure 5 en page suivante traduit les parts de marché cumulé sur les 239 MW opérationnels en fin 2003. Au total 13 constructeurs sont représentés. Le leader est toujours NOR-DEX avec 91 MW installés (38%) suivi de GAMESA (12,8%) et de VERGNET (9,3%). Ces trois constructeurs ont donc fourni 60% du parc. Avec la part de JEUMONT (7,5%), les constructeurs Français ont fourni au total un peu moins de 17% du parc.

Tableau 4 : Parts des parcs opérationnels en fin 2002 et en fin 2003 et variation

Fabricants	Fin 2003	(239 MV)	Fin 2002	(148 MV)	Evolution	
	MW	%	MW	%	points de %	
Nordex	90,85	38%	58,6	39,6%	-1,6%	
Gamesa	30,48	12,8%	15,1	10,2%	2,6%	
Vergnet	22,24	9,3%	13,9	9,4%	-0,1%	
Vestas	22,05	9,2%	7,5	5,1%	4,1%	
Bonus	20,8	8,7%	20,7	14%	-5,3%	
Jeumont	18	7,5%	4,4	3%	4,5%	
Wind master	12,9	5,4%	12,9	8,7%	-3,3%	
Neg Micon	. 9	3,8%	9	6,1%	-2,3%	
Enercon	4	1,7%	0	0%	1,7%	
Lagerwey	3,83	1,6%	3,8	2,6%	-1%	
GE wind	3	1,3%	0	0%	1,3%	
Repower	1,5	0,6%	1,5	1%	-0,4%	
Tacke	0,4	0,2%	0,4	0,3%	-0,1%	
TOTAL	239	100%	148	100%		



## 2.4 Production d'électricité

Le tableau 5 ci-dessous résume la meilleure estimation possible à ce jour de la production du parc en 2003. Elle est basée sur les productions détaillées mises à disposition du public des quelques 176 MW de parcs éoliens dont les exploitants ayant joué la transparence ont fourni en janvier 2004 des données sur au moins 9 à 11 mois pour ceux installés avant la fin 2002, et depuis leur date de mise en service industriel pour ceux ayant été installés en 2003. Le total de production correspondant en 2003 est de 311 GWh, et une extrapolation sur les quelques mois manquants aboutit à une production probable de 315 GWh sur tout 2003. Puis une estimation des productions non fournies à partir d'une estimation des facteurs de charge des parcs concernés a été effectuée et permet d'évaluer à 455 GWh l'énergie éolienne produite par les 239 MW du parc pendant l'année civile 2003, soit environ 57% de plus qu'en 2002. Une extrapolation de la production des parcs installés en 2003 à une année complète permet ensuite d'évaluer à 540 GWh/an le productible des 239 MW du parc en fin 2003 en année pleine, par exemple l'année 2004.

Ce productible de 540 GWh/an correspond à un facteur de charge (rapport entre le productible et une production théorique des 239 MW sur 8760 heures) de Fc = 25.8%, ou de Nh = 2259heures/an de fonctionnement équivalent à cette puissance nominale de 239 MW. La surface cumulée des rotors étant de 563000 m², le productible moyen est de Eas = 959 kWh/an.m<sup>2</sup>. Sous réserve de la validation de ces valeurs par des calculs ultérieurs basés sur la somme des productions réellement constatées par les gestionnaires du réseau, ces deux valeurs de Nh et Eas sont représentatives dans un contexte européen d'un parc de productivité satisfaisante.

Ces 540 GWh de productible ne représentent encore que 0,15% de la consommation intérieure d'électricité en France métropolitaine (467,3 TWh en 2003 selon RTE, pour 58,5 millions d'habitants). Avec le ratio correspondant d'une consommation globale de 8000 kWh par habitant, cela repré-

Tableau 5 : Estimation des productions d'électricité éolienne en 2003 et du productible en année pleine

Parc et production e	stimée	2003	2002	Variation
P nouvelle	MW/an	90,6	53	+71%
P parc fin année	MW	239	148	+61%
Production estimée Ea	GWh/an	455	289	+57%
Productible estimé Ep	GWh/an	540	345	+57%
Nh productible	h/an	2259	2329	NS
Fc productible	%	25,8%	26,6%	NS
Eas productible	kWH/m².an	959		

sente la consommation totale d'une ville représentative de l'activité économique moyenne française de 67500 habitants. Si on rapporte cette production à la consommation moyenne d'électricité spécifique d'un foyer moyen de 2,7 personnes soit environ 2300 kWh/an, ce sont déjà les besoins électriques domestiques et non thermiques de l'équivalent de plus de 500000 personnes qui seront couverts par l'éolien en France en 2004.

# Mise en perspective du développement éolien en France

# 3.1 Comparaison historique avec l'Allemagne et par rapport aux objectifs de court terme

Depuis 2001 le développement de l'énergie éolienne en France est principalement basé sur la disponibilité de tarifs garantis pour les parcs bénéficiant de l'obligation d'achat, c'est à dire de moins de 12 MW, puisque les premiers appels d'offres pour des systèmes éoliens de plus grande puissance à terre ou en mer ne seront lancés qu'en 2004 pour mise en service industriel des installations avant la fin de l'année 2006. Ce système tarifaire est inspiré de celui défini depuis avril 2000 par la loi allemande sur les énergies renouvelables. Mais l'ouverture du marché allemand de l'énergie éolienne s'est fait dès le début de la décennie 90 par un premier système tarifaire qui a permis de lancer un premier programme fondateur '250 MW éoliens", exactement l'ordre de grandeur du parc français actuel.

Si l'on reporte avec 10 ans de décalage les courbes de développement de l'éolien en Allemagne et en France; on voit sur la figure 6 ci-contre que sur les 5 premières années ce développement est pratiquement identique. Au premier abord, on pourrait penser que la France est donc sur le même "sentier vertueux" de développement de l'éolien. Mais plusieurs observations mènent à tempérer cette conclusion:

• Ces dix ans de décalage auraient dû plus profiter aux développeurs de projets en France: machines éprouvées et de plus grande taille disponibles commercialement, retour d'expérience disponibles pour le montage des projets.

- Il aurait dû en être de même pour la levée des obstacles non tarifaires en France, notamment pour la simplification des procédures et pour la réduction des délais pour les autorisations de raccordement au réseau et la délivrance des permis de construire.
- Au vu du "passage à la vitesse supérieure" pris par le marché Allemand en 1993-1994 (correspondant aux années 2003-2004 sur la figure 6) et compte tenu de l'objectif minimal de 2000 MW de parc éolien en service en fin 2006 fixé par la PPI [3] et reporté sur la figure, on voit que "l'accélération" de l'ouverture de marché en devrait être encore plus forte en France sur 2003-2006 qu'elle ne l'a été sur 1994-1996 en Allemagne, et ce d'autant plus que la limite supérieure fixée par la PPI a été fixée à 6000 MW. On constate au contraire sur 2002-2003 un léger décrochement de la croissance du parc en France par rapport à l'historique 1992-1993 en Allemagne.

La réalisation de l'objectif minimal de 2 000 MW en fin 2006 fixé par la PPI nécessite donc que le plus grand soin soit apporté à la disparition des obstacles non tarifaires à la réalisation des projets. Pour cela, le 10 septembre 2003 la Ministre de l'Ecologie et du Développement Durable, le Ministre de l'Equipement et la Ministre déléguée à l'Industrie ont adressé aux préfets de Région et de Département une lettre concernant le développement de l'énergie éolienne

terrestre avec des instructions détaillées [4]. Le suivi de l'application de cette circulaire devrait donc permettre de vérifier ses effets ou de définir quelles mesures restent encore nécessaires pour permettre de dépasser ce seuil minimum de 2000 MW en cumulant les projets bénéficiant de l'obligation d'achat et des tarifs et ceux issus des appels d'offres en cours de lancement et qui pourraient être mis en service avant fin 2006.

# 3.2 Perspectives de développement à plus long terme (2010-2020)

La France s'est engagée à réaliser les objectifs indicatifs qui lui ont été proposés dans le cadre de la directive Européenne concernant la production d'électricité par sources d'énergie renouvelables à l'horizon 2010. Compte tenu des contraintes pesant sur le développement des deux autres sources d'énergies renouvelables qui peuvent participer significativement à cet objectif (la biomasse en cogénération et la petite hydroélectricité), ceci passe par un développement de l'énergie éolienne situé typiquement entre les courbes en rouge et en bleu de la figure 7 en page suivante. La courbe rouge en trait plein représente un "scénario minimum de développement" qui a été détaillé dans la référence [1]. La courbe bleue en pointillé établie elle aussi en début 2003 est représentative d'un développement idéal de l'éolien pour avoir des chances d'atteindre les objectifs de la directive en 2010. Ces deux courbes encadrent sur le court terme la valeur

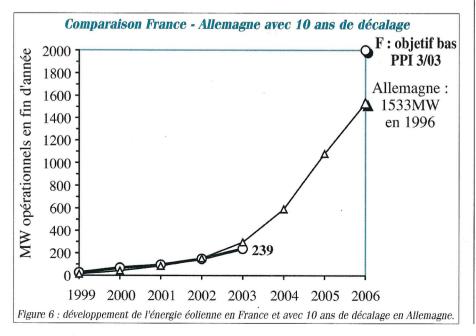
minimum de la PPI en fin 2006 soit 2000 MW. A horizon 2010 elles conduisent à un parc opérationnel compris entre 7700 et 11400 MW.

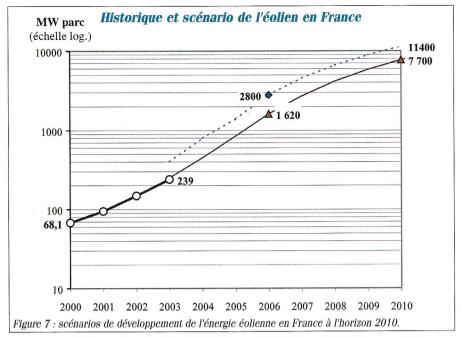
Ces deux scénarios sont à replacer dans le cadre de la réévaluation des perspectives de développement de l'éolien à ces deux horizons. On a déjà cité la réévaluation faite en 2003 par l'EWEA de la taille probable du parc éolien des 15 pays de l'Union Européenne à 75000 MW en 2010 (dont 10000 en mer) au lieu des 60000 MW évalués en 2000. L'évaluation déjà citée dans [2] d'un parc éolien Européen de 180 GW en 2020 (dont 70 GW en mer) et produisant 440 TWh/an à cet horizon a été reprise en janvier 2004 par le Conseil Européen des Energies renouvelables (EREC) dans son document de proposition d'officialisation d'un objectif de couverture par les énergies renouvelables de 20% de la consommation d'énergie primaire des 15 pays actuels de l'Union Européenne en 2020 [5]. Le scénario correspondant est représenté par la courbe brune de la figure 8 ci-après où sont aussi reportés les deux scénarios du développement de l'éolien en France cités ci dessus et extrapolés jusqu'en 2020.

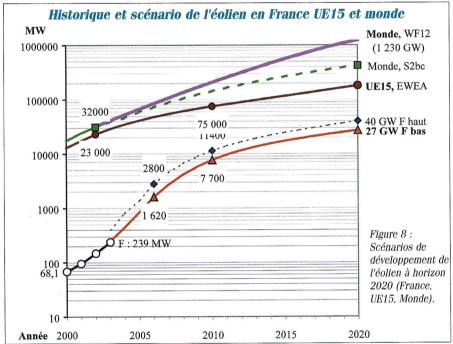
Pour ce qui concerne les scénarios de développement mondial de l'éolien, deux d'entre eux sont reportés en figure 8 :

- Un scénario décrit dans la référence [6] et basé sur la comparaison historique du développement de l'hydro-électricité et de l'énergie éolienne, en prenant en compte une accélération de la diffusion de cette dernière filière sur notre siècle plus rapide que celle de l'hydroélectricité au XX<sup>éme</sup> siècle et aboutissant à une production identique de ces deux filières sur le XXI<sup>éme</sup> siècle à hauteur chacune de plus de 540000 TWh cumulés (courbe intermédiaire en trait plein sur la figure 8).
- Le scénario "Wind Force 12" (12% de couverture des besoins d'électricité mondiaux en 2020 par l'éolien) décrit dans la référence [7] (courbe supérieure en trait plein sur la figure 8).

On retiendra principalement de cette analyse que le développement de l'énergie éolienne en Europe et dans le monde va continuer à être très rapide et qu'il est donc probable que son







rythme de développement en France sera aussi soutenu, non seulement d'ici 2010, mais aussi au-delà, car le contexte Européen de "l'après Kyoto" restera sans aucun doute une des motivations de son développement.

Malgré les scores respectables mais encore timides de l'industrie éolienne française, il est aussi probable que les motivations de politiques industrielles et de création d'emplois joueront aussi pour pousser au développement de l'énergie éolienne en France. Ainsi, selon la référence [2] les investissements éoliens en Europe sont estimés à 46 GW de 2004 à 2010 répartis entre 36 GW à terre et 10 GW en mer. On peut donc estimer les investissements correspondants en

machines et développement de parcs à environ 44 G€ d'investissements (40 à terre et 14 en mer). Les nouvelles installations éoliennes requises dans ce scénario et reprises en référence [5] sur la période 2011-2020 dans les 15 pays actuels de l'UE seront de 105 GW. Compte tenu de la montée en puissance de l'éolien en mer avec environ 60 GW installés sur la période et compte tenu de quelques 45 GW supplémentaires à terre, le montant correspondant des investissements éoliens sur cette période est estimé par l'EREC à environ 100 G€.

Au total ces quelques 144 G€ d'investissements éoliens sur les 17 ans séparant 2004 de 2020 représenteraient donc environ un tiers des

443 G€ d'investissements en énergie renouvelables que l'EREC estime nécessaires pour faire passer la part des énergies renouvelables à 20% de la consommation d'énergie primaire des 15 pays actuels de l'Union Européenne en 2020, avec un sous objectif de 33% des consommations d'électricité assurées à partir de sources d'énergie renouvelables à cet horizon.

Même si les décisions des instances européennes et nationales à prendre d'ici 2010 ne seront pas forcément fondées exactement sur ce scénario, il est probable que ces ordres de grandeur resteront valables, et il est donc crucial que le développement à court terme de l'énergie éolienne en France reste en phase avec ces perspectives communautaires et mondiales.

# Références:

- [1] "Bilan et mise en perspective du développement de l'énergie éolienne en France", B. Chabot, ADEME, mai 2003. Document téléchargeable à: http://www.suivieolien.com/francais/DocsPDF/EOLF02V3.PDF
- [2] "Wind Power Targets for Europe: 75000 MW by 2010", EWEA, octobre 2003: Document téléchargeable à : http://www.ewea.org/ 03publications/75MW.htm
- [3] "Arrêté du 7 mars 2003 relatif à la programmation pluriannuelle des investissements de production d'électricité", Journal officiel de la république Française, 18 mars 2003, p. 4692-4692.
- [4] Lettre circulaire aux préfets du 10 septembre 2003 et ses annexes, téléchargeable à: http://www.industrie.gouv.fr/energie/renow/ circ-eol-10-09-03.pdf
- [5] "Renewable energy target for Europe: 20 by 2020", EREC. janvier 2004, document téléchargeable à: http://www.ewea.org/ documents/EREC-Targets%202020-def.pdf
- [6] "A Long Term Wind Power Prospect from Hydropower Retrospect and Prospect: Scenarios and Lessons", B. Chabot, actes de la conférence EWEA "Wind Power for the 21st Century" 25-27 septembre 2000, Kassel, Allemagne.
- [7] "Wind Force 12: A Blueprint To Achieve 12% Of The World's Electricity From Wind Power By 2020", EWEA, GREENPEACE, document téléchargeable à: http://www.ewea.org/documents/ WindForce12.pdf.



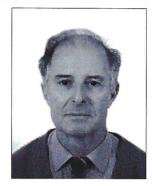
# L'Institut Français du Pétrole

# Par Georges ANTON

La visite réalisée par l'ADASTA dans la "VALLEE DE LA CHIMIE" - Banlieue industrielle de Lyon - le 27.04.04 nous avait permis de mentionner rapidement l'IFP dans la revue Auvergne Sciences n°58 de juin 2004.

A l'aide de documents qui nous ont été aimablement communiqués par M. Roland HUIN, Directeur de l'Etablissement de Solaize, que nous remercions, il nous est aujourd'hui possible de faire un compte-rendu circonstancié sur l'IFP, ce qui permettra au lecteur de se familiariser avec cet organisme prestigieux.

Nous tenons également à remercier Mme Reverdy, chargée de communication.



# Qu'est-ce que l'IFP ? Nature et objectifs

Etablissement privé dont le financement est assuré par une dotation budgétaire de l'Etat, l'Institut Français du Pétrole, créé en 1944, est un centre indépendant de recherche et de développement industriel organisé autour des quatre domaines fondamentaux de la chaîne pétrolière (exploration-gisements, forage-production, raffinagepétrochimie, moteurs-énergie). Dans un contexte où les hydrocarbures, notamment pétrole et gaz, resteront très largement incontournables dans les transports pendant de nombreuses décennies encore, la vocation fondamentale de l'IFP est d'innover, de développer et de transférer les technologies qui permettront à la collectivité, à l'industrie des hydrocarbures et de l'automobile, une croissance durable et respectueuse de l'environnement.

Cette action de recherche et de développement doit être doublée d'une action de formation et d'information afin d'une part, de transférer aux jeunes générations les compétences scientifiques nécessaires, et d'autre part de mettre à la disposition des industriels, des décideurs politiques et de l'opinion publique, des données fiables et objectives.

### L'IFP en bref : faits et chiffres

A fin 2003, l'effectif était de 1800 personnes, dont 80% en R&D (Recherche & Développement), pour un budget total de 291,5 millions d'Euros. On signalera d'autre part 1144 dépôts de brevets en 2003 ; l'IFP est ainsi le dixième déposant national en France.

Onze Directions de recherche regroupent l'ensemble des compétences scientifiques et des moyens techniques nécessaires à la réalisation des programmes établis chaque année en concertation étroite avec l'industrie. Un flux continu d'innovations vient ainsi enrichir un patrimoine scientifique et technologique fort d'un portefeuille de plus de 12 600 brevets "vivants".

#### Le Groupe IFP

- L'IFP s'est engagé depuis plusieurs décennies dans une voie de valorisation industrielle consistant à soutenir la création et le développement de sociétés. Cette politique a connu d'incontestables succès industriels :
- Technip et Coflexip, créés respectivement en 1958 et 1971, ont fusionné en 2001, ce qui a conduit à la formation d'un des leaders mondiaux du secteur parapétrolier (ingénierie et constructions d'installations industrielles)

 Procatalyse, qui voit le jour en 1959, donne naissance à Axens en 2001 par fusion avec la direction de l'IFP en charge de la vente des procédés de raffinage et de pétrochimie; Axens est désormais un acteur reconnu internationalement dans l'aval pétrolier (bailleur de licences de procédés, fournisseur de catalyseurs et adsorbants)

Ces sociétés, ainsi que d'autres que nous n'avons pas mentionnées, couvrent l'ensemble de la chaîne parapétrolière et offrent des services pétroliers hauts de gamme sur le marché international des hydrocarbures et de ses dérivés.

# Domaine explorationgisements

5 axes stratégiques composent ce domaine.

# 1) Exploration des nouvelles provinces pétrolières

L'exploration de nouvelles réserves pétrolières est une nécessité afin de répondre à une demande mondiale qui devrait croître pendant les 20 prochaines années. En plus de sa contribution à l'inventaire du domaine maritime minier national, l'IFP s'est attaché à identifier des cibles potentielles situées dans des zones de front de chaîne de montagnes, difficiles à imager par la sismique. L'IFP a donc développé en matière de géologie structurale des concepts novateurs permettant de modéliser l'organisation et la déformation des structures géologiques : 4 brevets relatifs à cet axe ont été déposés en 2003.

## 2) Evaluation des systèmes pétroliers

Il s'agit de prédire la qualité des réservoirs, les volumes en place, la nature des hydrocarbures ainsi que tout autre paramètre ayant une incidence sur les coûts d'exploration : des logiciels divers ont été élaborés afin d'atteindre ce but (Dionisos simule les processus sédimentaires d'un bassin pétrolier, Temis 3D évalue le potentiel pétrolier d'une région donnée, par exemple l'offshore profond du golfe du Mexique ...).

# 3) Récupération améliorée du pétrole

Prolonger la vie des gisements représente pour l'industrie pétrolière et nombre de régions pétrolières - à commencer par la mer du Nord - un réel enjeu pour les décennies qui viennent. Il faut donc améliorer la modélisation géologique des réservoirs, les méthodes de mesure des propriétés thermodynamiques et d'écoulement des fluides au sein des roches réservoir et enfin, simuler l'exploitation des réservoirs. Des percées significatives ont été réalisées dans ces domaines, matérialisées par la prise de 8 brevets en 2002.

#### 4) Monitoring des gisements

Le monitoring des réservoirs pétroliers consiste dans l'optimisation de l'exploitation des dits réservoirs : il nécessite l'utilisation d'un système de gestion efficace et un chaînage de logiciels autorisant la réactualisation du modèle de réservoir compte tenu des informations acquises en cours d'exploitation. 6 brevets ont été déposés dans ce domaine en 2002.

#### 5) Environnement

Remédier aux pollutions éventuelles du sous-sol et des aquifères d'une part, et d'autre part proposer des solutions quant à la réduction de l'émission de gaz à effet de serre essentiellement le CO2 - sont deux composantes essentielles de l'industrie pétrolière dans le domaine de l'environnement. Le premier point est souvent traité par l'IFP en partenariat avec des PME-PMI. Sur le second point. l'IFP a développé une activité considérable en matière de séquestration du CO<sub>2</sub>, activité ayant pour objectif la mise au point et la validation des procédés de stockage du CO2 dans des nappes aquifères, des gisements d'hydrocarbures épuisés ou des veines de charbon.

On notera que dans le domaine de l'environnement, l'IFP est un acteur européen majeur, leader du projet Castor qui est financé à 50% par la Commission Européenne.

# Domaine forageproduction

Dans ce domaine, plusieurs évolutions technologiques majeures sont en cours : exploitation de gisements à des profondeurs d'eau de plus en plus importantes, part grandissante de la production de gaz dans le monde et, enfin, mise en production des réserves d'huiles lourdes.

D'autres travaux sont en cours pour répondre aux besoins industriels en ce qui concerne par exemple, la mise en production de ces champs, une récupération plus importante des champs matures, une meilleure localisation des zones productrices ou le démantèlement des plateformes.

On notera que les réservoirs à structure géologique complexe sont de plus en plus fréquents et qu'ils nécessitent la mise en œuvre de techniques spécifiques et innovantes de production (architectures de drainage complexes). Celles-ci doivent permettre d'améliorer le placement des puits dans le réservoir mais également d'adapter les fluides de forage à la géométrie du puits et aux caractéristiques des terrains traversés.

Citons quelques thèmes majeurs de recherche :

- travaux centrés sur le développement des technologies nécessaires au forage et à la mise en production des champs par ultra-grand fond
- amélioration des conditions de forage permettant la mise en oeuvre d'architectures de drainage complexes, tout en limitant les coûts opérationnels
- optimisation et adaptation de conduites flexibles pour des profondeurs d'eau importantes
- travaux sur la rhéologie des bruts lourds (visqueux) et leur mise en émulsion (fluidification), afin de permettre une meilleure compréhension des phénomènes, la mise au point de nouveaux additifs et faciliter leur transport et production.

# Domaine raffinagepétrochimie

Dans les domaines du raffinage et de la pétrochimie, les travaux de R&D portent sur :

- l'amélioration des performances des technologies entraînant une réduction des coûts d'investissement et d'exploitation, une consommation d'énergie minimale, des émissions de CO<sub>2</sub> réduites et une limitation des rejets
- une contribution prioritaire au développement des procédés et des catalyseurs permettant de répondre à la demande en quantité et qualité de produits.

En pétrochimie, les recherches sont essentiellement consacrées à la production de bases oléfiniques et aromatiques (benzène, toluène, xylène et alkylbenzènes linéaires). Membre actif d'Agrice 2, l'IFP a également travaillé sur des produits obtenus à partir de la biomasse ayant des applications dans son domaine : lubrifiants, tensioactifs et additifs biodégradables.

Mention particulière sera faite concernant le gaz en général (gaz naturel, bio-gaz...) qui est à la fois un vecteur énergétique et une matière première de tout premier plan. Le programme relatif au gaz comprend 3 grands volets :

- traitements, liquéfaction et conversion chimique

- production d'hydrogène ou de gaz de synthèse à partir d'hydrocarbures liquides ou biomasse
- production d'énergie à partir de déchets.

# Domaine moteurénergie

La motorisation est l'un des enjeux prioritaires du transport routier. L'industrie automobile mène un effort de recherche considérable dans le domaine des moteurs. L'IFP s'est fortement engagé dans ce processus de progrès en développant une expertise importante s'appuyant sur des chercheurs de haut niveau, ainsi que sur des bancs d'essais, des équipements de mesure performants et des outils de modélisation 3D extrêmement rapides et performants. Les points suivants méritent d'être signalés.

#### 1) Compréhension et maîtrise de la combustion

La combustion est au cœur du fonctionnement des moteurs thermiques : son amélioration et son contrôle sont essentiels pour leur optimisation, pour réduire leur consommation et leurs émissions de polluants. Par exemple, dans le cas de l'injection directe, il a été mis en évidence que la présence de constituants à volatilité élevée dans le carburant pouvait, dans certaines conditions, provoquer une modification extrême des caractéristiques du jet d'injection. Pour ce qui est du diesel, la visualisation du carburant liquide et vapeur par fluorescence induite par laser, au moment de l'auto inflammation et de la combustion, ont permis de mieux comprendre l'impact des stratégies d'injection sur le déroulement de celle-ci. Différents sousmodèles de calcul (auto inflammation. combustion turbulente, formation des polluants) capitalisant ces connaissances ont été intégrés dans le code de modélisation IFP-C3D. Ce code permet de prédire très précisément le comportement de nouvelles géométries de chambres de combustion.

La combustion se manifeste également par la production d'espèces chimiques indésirables. La caractérisation détaillée de ces substances polluantes est indispensable. On notera à



Procédé Prime-D de production de gazole à très basse teneur en soufre (crédit IFP).

ce sujet que 2002 a vu la mise au point d'un système de prélèvement en ligne des hydrocarbures aromatiques polycycliques gazeux pour leur dosage à l'échappement des véhicules et des moteurs sur bancs à rouleaux ou sur bancs moteurs. L'IFP a de même généralisé l'emploi d'équipements de mesure de la taille et de la quantité de particules sur ses installations moteurs et véhicules. L'ensemble de ces moyens d'essais est couramment utilisé pour la plupart des études.

# 2) Formulation des carburants et réduction des pollutions

Plusieurs études de recherche ont été menées par l'IFP parmi lesquelles on peut citer :

- analyse de l'impact des caractéristiques des gazoles sur les performances et le déroulement de la combustion des moteurs diesel
- réalisation de programmes visant à formuler des carburants innovants.

# 3) Procédés de combustion et technologies moteurs

Les travaux de compréhension et de maîtrise de la combustion ont conduit l'IFP à mettre au point des technologies moteurs innovantes, parmi lesquelles on peut citer:

la mise en œuvre de nouveaux procédés de combustion permettant une réduction drastique des émissions à la source. Le procédé NADI permet ainsi de réduire les émissions de particules et d'oxydes d'azote des moteurs diesel jusqu'à 100 fois sur certains points de fonctionnement

par rapport à un moteur diesel conventionnel

- le post-traitement des émissions : une voie importante pour l'atteinte des objectifs d'anti-pollution (exemple du piège à NOx et filtration des particules pour les moteurs diesel)
- la réduction des pollutions sonores, avec la validation d'une méthode innovante de mesure du rayonnement acoustique localisant l'intensité des sources d'émission

Enfin, les compétences développées dans le cadre des travaux en Moteurs-Energie ont permis à l'IFP d'apporter un soutien à divers projets portés par des PME-PMI, par exemple :

- la mise au point de filtres en carbure de silicium permettant l'élimination de suies dans les gaz.d'échappement des automobiles diesel
- l'étude de dispositifs permettant de faire varier le taux de compression des moteurs.

# Un mot pour conclure

L'ADASTA ne peut dans le cadre restreint de quelques pages, faire la description exhaustive d'un organisme de Recherche et de Développement aussi important que l'IFP. Nous espérons cependant avoir convaincu le lecteur, que l'Institut Français du Pétrole est un groupe industriel de taille internationale dont l'action consiste à renouveler, accroître et diversifier les ressources mondiales d'hydrocarbures, pour satisfaire les besoins mondiaux croissants dans le domaine des transports, tout en réduisant l'impact de cette industrie sur l'environnement.



# Fabrication et utilisation des Silicones

# Par Georges ANTON

Nous tenons à remercier M. J.F. Destandeau de Rhodia-Silicones qui nous a aimablement autorisés à utiliser les documents qu'il nous a remis lors de la visite que l'ADASTA a effectuée en avril dernier, pour réaliser cet article.

Les silicones ont une telle importance dans nos sociétés industrielles - la plupart du temps méconnue du grand public - qu'il s'avère nécessaire de faire connaître ces produits. En décidant la visite de RHODIA SILICONES fin avril 2004, l'ADASTA se plaçait volontairement dans cette optique. Quelques mois s'étant écoulés depuis cette visite, nous allons reprendre les points forts qui nous avaient impressionnés et faire une synthèse, qui. nous l'espérons, permettra de diffuser autour de nous les éléments fondamentaux de cette industrie.

Nous développerons successivement les chapitres suivants :

- Rhodia Silicones, un des leaders mondiaux de la profession
- Définition, obtention et propriétés des silicones
- Leurs domaines d'utilisation.

# Rhodia Silicones : historique et activités

Rhodia Chimie, issue de la Société bien connue Rhône-Poulenc Chimie. voit le jour le 1er janvier 1998. Cette naissance officielle faisant suite aux inévitables restructurations caractérisant les grands groupes industriels, ne signait pas le début de la fabrication à grande échelle des silicones. En effet, dès les années 1944/1948, les essais préliminaires et les premières fabrications d'organosiliciques démarraient à Saint-Fons : des sociétés filiales de Rhône-Poulenc spécialisées dans les silicones voyaient le jour par la suite et finalement l'Entreprise Rhodia Silicones SAS regroupant les sites de Saint-Fons et le secteur MCS de Roussillon était créée le 1er avril 1999. L'entité dénommée "Usine Silicones Rhône-Alpes" (USRA) regroupe ces secteurs de production.

L'Entreprise USRA, dont le chiffre d'affaires était de 264 millions d'Euros en 2002 pour un effectif de 593 personnes, produit les matières premières (silicium, chlorosilanes, méthanol, chlorure de méthyle...) nécessaires à l'obtention des silicones, ainsi que tous les silicones dont l'Industrie a besoin.

Les technologies utilisées pour l'obtention de tous ces dérivés sont variées, nous n'en citerons que quelques-unes: distillation, hydrolyse, polymérisation, broyage, mise en émulsion...

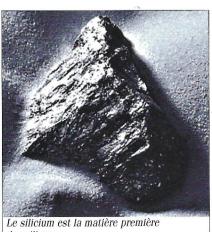
Rhodia "Silicones" fait partie de la division "Spécialités industrielles" de Rhodia et figure parmi les leaders mondiaux de la technologie des silicones.

#### Nature chimique des silicones : leur obtention

A la base des silicones, on trouve le silicium, élément chimique présent dans l'écorce terrestre sous forme de silice et d'aluminosilicates. Isolé pour la première fois par le chimiste suédois Berzelius (1779-1848) et structurellement analogue au carbone puisque faisant partie de la IVe colonne de la classification périodique des éléments, il s'en différencie très nettement par le fait que, si le carbone existe dans la nature à l'état pur ou engagé dans des composés organi-



ques combustibles, le silicium introuvable à l'état pur, est présent dans des combinaisons minérales chimiquement et thermiquement stables. D'autre part, on ne connaît pratiquement pas de composés dans lesquels les atomes de silicium sont unis entre eux par des liaisons covalentes : la caractéristique des silicates et des silicones est l'existence de chaînes dans lesquelles les atomes de silicium ne sont pas liés directement entre eux mais unis par des atomes d'oxygène.



des silicones

Accéder aux silicones nécessite :

- L'obtention préalable du silicium en poudre. Cet élément est extrait d'une silice naturelle pure (le sable de Fontainebleau) par un processus électrochimique.
- 2. La synthèse des précurseurs des silicones que sont les chlorosilanes, par réaction entre le silicium en poudre et le chlorure de méthyle gaz. Cette réaction appelée la "synthèse directe" est effectuée dans de grands réacteurs et produit un mélange brut de plusieurs chlorosilanes liquides séparés par distillation. Ce sont respectivement les méthyltri-, diméthyldi- et triméthylchlorosilanes. Il est parfois nécessaire de modifier les groupements CH3 par d'autres groupements plus ou moins réactifs.

Ces produits sont fabriqués à l'usine Rhodia de Roussillon (France).

# Des chlorosilanes aux silicones de base

Les chlorosilanes sont soumis à l'hydrolyse et polycondensation pour obtenir les silicones de base : huiles, gommes et résines. Huiles et gommes sont des composés linéaires différenciés par leur viscosité ; les résines ont un squelette ramifié formant des réseaux.

L'hydrolyse conduit à des polymères de petite longueur qu'il faudra ensuite allonger pour obtenir la masse moléculaire souhaitée.

L'hydrolyse transforme le chlorosilane en un composé intermédiaire nommé silanol. Le chlore est libéré sous forme d'HCl; le silanol instable réagit immédiatement avec un autre silanol pour former l'enchaînement Si-O-Si qui est le "pont siloxane". La polycondensation de ces polymères de faible masse molaire s'effectue comme dans toute catalyse, grâce des catalyseurs avec ajout de limiteurs de chaîne.

## Des silicones de base aux produits commercialisés

A partir des silicones de base, Rhodia élabore un ensemble de compositions silicones aux textures et aux propriétés spécifiques à chaque utilisation. On citera:

#### - Les huiles silicones

Ces polysiloxanes sont linéaires ou faiblement ramifiés, et fluides. Les caractéristiques peuvent être modulées par remplacement des groupes - CH3 par des groupes phényles (inertes), vinyles ou amino (réactifs). Les viscosités s'étendent de 0,65 à 2.106 mPa.s (audelà les produits sont des gommes). Leur stabilité thermique est remarquable entre -70°C et +250°C. Elles possèdent également un très bon pouvoir d'étalement, une compressibilité élevée, de bonnes propriétés diélectriques, une résistance remarquable au cisaillement, au vieillissement, à l'oxydation et à l'hydrolyse.

Elles sont utilisées comme fluides hydrauliques, diélectriques, de chauffage ou de refroidissement et en tant que lubrifiants et anti-adhérents. On les emploie largement en cosmétique, pharmacie et médecine.

On notera également l'existence de nombreuses compositions dérivées de ces huiles. Ainsi émulsions, solutions et aérosols pour des traitements de surface ; pâtes et graisses utilisées respectivement comme produits d'étanchéité ou d'isolation électrique ; antimousses utilisés en agrochimie et dans l'industrie du papier.

#### - Les élastomères silicones

Ils sont formulés à partir de chaînes linéaires réactives auxquelles sont ajoutés un agent réticulant et des charges minérales conférant de bonnes propriétés mécaniques. On distingue :

#### Les élastomères silicones vulcanisables à chaud

Ils sont composés de chaînes macromoléculaires linéaires de forte masse moléculaire portant des groupements réactifs divers. Différentes matières premières complémentaires leur donnent leurs propriétés : silice de pyrogénation pour renforcer les caractéristiques mécaniques, additifs divers... La réticulation est assurée par des peroxydes organiques.

Leur tenue mécanique en température est exceptionnelle (utilisation possible de –50° à +300°); ils sont chimiquement inertes donc stables au vieillissement. On peut même faire des produits transparents par utilisation de silices suffisamment fines.

Applications: joints divers en automobile et aéronautique, protection électrique telle que câbles de sécurité et connecteurs... Les applications alimentaires, pharmaceutiques et biomédicales sont formulées pour répondre aux réglementations européennes et américaines.

#### Les élastomères silicones vulcanisables à froid

Les polymères à la base de ces produits sont des huiles réactives plus ou moins visqueuses auxquelles sont ajoutées des charges minérales renforçantes. La réticulation s'effectue à température ambiante grâce à un agent réticulant et un catalyseur.

L'élastomère est dit "mono composant" quand le système durcit directement sous l'action de l'humidité atmosphérique : il est alors présenté en emballage étanche type cartouche. Lorsque les réactifs du système (dont l'un contient le catalyseur) sont présentés dans 2 emballages séparés, l'élastomère est dit "bicomposant".

Les qualités des mono composants sont l'adhérence, l'élasticité et la durabilité; ils apportent des solutions performantes aux problèmes d'étanchéité et d'assemblage.

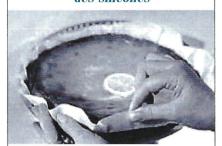
La réticulation des bicomposants est déclenchée par le mélange des 2 produits thermiquement très stables, restant souples de -80°C à +250°C, ils ne se décomposent qu'au-delà de 350°C. Ils sont utilisés en particulier dans la réalisation de moules souples et en enduction textile.

## - Les résines silicones

Ce sont des polymères de masse molaire assez faible à structure tridimensionnelle. On peut les associer avec d'autres composés organiques pour réaliser des résines mixtes polyester-silicones par exemple. La chaîne siloxane contient 2 types de groupements non réactifs responsables des caractéristiques de la résine : les groupes - CH<sub>3</sub> apportent hydrophobie, anti-adhérence et dureté de surface alors que les groupes - C6H5 assurent résistance à la température et aux agents climatiques, flexibilité à chaud et compatibilité aux produits organiques. Elles se présentent généralement diluées dans un solvant aliphatique ou aromatique.

Elles sont utilisées dans l'industrie des peintures, en isolation électrique, pour l'hydrofugation des matériaux de construction et des façades...

# Quelques exemples d'utilisation des silicones



Anti-adhérence des papiers de cuisson alimentaire



Profilés et tubes à usage médical en EVC Silbione



Protection des sondes de forage

# L'expansion des silicones : conclusion

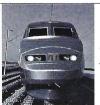
Au travers des explications que nous venons de donner, on comprend bien que les SILICONES possèdent des propriétés exceptionnelles et modulables, et qui s'avèrent déterminantes dans les domaines où les exigences technologiques sont élevées.

La gamme Rhodia, complète et innovante, participe à l'expansion des silicones dans la plupart des domaines de l'activité humaine : des monuments anciens aux immeubles de verre, des moteurs automobiles aux vitres des TGV, des circuits électroniques aux lignes de haute tension, de la prise d'empreintes dentaires aux sondes intracorporelles, des airbags aux exploits sportifs...

La Société Rhodia Silicones, qui s'est donné pour mission d'être un acteur majeur des silicones, fonde sa stratégie sur une présence large et puissante en Europe et dans le Monde.



Les trois palais de la colline du Capitole à Rome ont été restaurés grâce aux consolidants Rhodorsil.



Collage des vitres frontales du TGV.

# La biocompatibilité

Les groupements méthyles apolaires présents au sein du matériau silicone sont incompatibles avec les produits et surfaces hydrophiles, comme les tissus biologiques. De plus, le squelette siloxanique des silicones est très stable face à l'oxydation et l'hydrolyse. Les matériaux silicones à l'état fini sont donc totalement inertes.

# L'anti-adhérence

Ce sont des groupements méthyles apolaires orientés vers l'extérieur, hostiles aux surfaces et produits hydrophiles, qui assurent un contact anti-adhérent et repoussent les surfaces même les plus adhésives. Les systèmes silicones mis en œuvre pour l'anti-adhérence se fixent rapidement sur leur support papier ou film et sont très réactifs.

- 4 types de réticulation sont actuellement utilisés :
- a) la condensation thermique en présence de sel organique d'étain, appréciée pour son coût modique et sa faible sensibilité aux inhibitions.
- b) L'addition thermique avec un catalyseur Pt permettant des vitesses d'enduction élevées sans élimination de produits volatils
- c) La réticulation sous radiation électronique extrêmement rapide (quelques millièmes de seconde) et se faisant à température ambiante.

# La lubrification

Les huiles, pâtes et graisses silicones contiennent de longues macromolécules linéaires, sous forme de réseau enchevêtré. La distance entre les chaînes est suffisante pour assurer leur glissement les unes par rapport aux autres.

# L'hydrofugation

Les silicones ayant des propriétés hydrofugeantes possèdent une basse tension superficielle et une grande perméabilité aux gaz, ce qui permet leur étalement en une couche très mince qui laisse circuler les gaz et ne bouche pas les pores : la vapeur d'eau présente dans les murs à cause de l'humidité intérieure peut s'évacuer. Les -CH3 hydrophobes, orientés vers l'extérieur de la couche de silicone, repoussent l'eau : c'est l'effet perlant.

# L'isolation

Les -CH3 apolaires ne permettent pas le passage du courant électrique. Les silicones ne sont pas des matériaux conducteurs et réalisent une bonne isolation électrique.



# Le monde des insectes

# Par Georges ANTON

Suite à la visite de l'ADASTA à MICROPOLIS le 24/04/04, au cours de laquelle les "Jeunes Pousses" ont pu découvrir le monde des insectes et voir également quelques mygales, nous pensons qu'il s'avère nécessaire de donner des indications scientifiques et entomologiques sur ces petits êtres, qui sont l'essence même de Micropolis, et dont il ne serait ni vrai ni juste de ne voir que les aspects désagréables : Qui ne s'est en effet jamais extasié devant l'intelligence des abeilles, l'inégalable beauté de nombreux papillons de jour, le vol élégant de la libellule, ou devant la coccinelle à 7 points qui crée joie et émerveillement auprès des petits enfants ?

# Position des insectes dans le règne animal

Rappelons que le vivant est subdivisé en 2 règnes : le règne animal et le règne végétal ; dans le premier, qui nous intéresse ici, on distingue habituellement 2 embranchements : les vertébrés et les invertébrés. Les insectes sont des invertébrés.

Pour reprendre les dénominations actuelles, nous dirons qu'ils font partie du phylum des arthropodes, termes synonymes respectivement d'embranchement et d'invertébrés, et retenus aujourd'hui dans la classification – on dit aussi taxinomie - des êtres vivants.

Les arthropodes sont eux-mêmes divisés en 6 classes :

#### Insectes

- arachnides (araignée, scorpion...)
- crustacés (crevette, crabe...)
- myriapodes (mille-pattes...)
- mérostomes (limule) et pycnogonides (parasites des poissons).



# Classification des insectes

La classe des insectes comprend une trentaine d'Ordres, eux-mêmes subdivisés en familles, en Genres et finalement en Espèces.

Nous n'indiquons ici que quelques Ordres rattachés à des Espèces familières :

- coléoptères (lucane, scarabée, coccinelle...)
- hétéroptères (punaise)
- isoptère (termite)
- odonates (libellule)
- diptères (mouche, moustique...)
- hyménoptères (abeille, fourmi...)
- lépidoptères (papillon).

**N.B.** - Le système de classification biologique utilisé actuellement a été développé par le biologiste suédois Carl von Linné (1707-1778). Il attribue à chaque espèce 2 noms, l'un identifiant l'espèce, et l'autre le genre auquel appartient l'espèce.

Ce système à 2 noms, connu comme étant la nomenclature binaire, est universellement utilisé en biologie.

Ainsi *Apis mellifera L.* est-il le nom de l'abeille commune de nos régions, le L désignant Linné qui, le premier, l'a décrite. Depuis Linné, d'autres espè-



ces d'abeilles à miel ont été répertoriées : un adjectif indiquant l'origine géographique de l'abeille suit alors le mot mellifera. L'abeille de Linné devient, pour éviter toute confusion, Apis mellifera mellifera L.

# Mais comment reconnaît-on les insectes ? Leurs particularités

La plupart des arthropodes possèdent des pattes et un corps segmenté à 32 parties fondamentales : tête, thorax et abdomen.

Le thorax de l'insecte adulte, au niveau duquel se situent les membres, comporte 3 paires de pattes et, chez la majorité d'entre eux, également des ailes : ce sont justement ces ailes qui distinguent les insectes de toutes les autres classes d'arthropodes. Il y a généralement 2 paires d'ailes, parfois une seule. Certaines familles ont des ailes atrophiées et d'autres pas d'ailes du tout.



Les particularités suivantes méritent d'être mentionnées :

- Les yeux peuvent être simples (ocelles) à raison de 2 ou 3 ocelles, ou composés d'un nombre variable d'unités (les ommatidies) semblables ou différentes : les libellules en possèdent par milliers. Chaque ommatidie comporte un cristallin propre, qui voit une certaine portion d'espace : le champ de vision est redonné par les différents cristallins se combinant en une mosaïque d'images. La taille des yeux est rarement proportionnée à la taille du corps et peut surprendre : ils sont portés par la tête où se trouvent les pièces buccales et les antennes. organe essentiel de l'odorat.
- Les pattes ne sont pas simplement des organes de locomotion : elles portent des organes sensoriels odorat, toucher, soies sensibles au contact et aux courants d'air - ainsi que parfois des organes auditifs ou de stridulation pouvant produire des sons : les sauterelles modulent leur chant en frottant leurs pattes postérieures contre leurs ailes antérieures.
- Le corps est recouvert d'une enveloppe protectrice : la cuticule, constituée de chitine et formant un squelette externe dont les différentes parties, appelées "sclérites", sont rigides et superposées à la manière d'une toiture. Sa solidité permet de conserver les insectes séchés.
- Les ailes sont des organes de la locomotion : elles furent longtemps le critère de classification des insectes en Aptérygotes (insectes aptères c.a.d. sans ailes) et Ptérygotes (insectes ailés), de loin les plus nombreux. On fait la distinction entre les ailes membraneuses des abeilles, des guêpes..., celles recouvertes d'écailles aux teintes diverses des papillons, ou encore les élytres que

sont les ailes antérieures, dures, épaisses, sans trace de nervation protégeant les ailes postérieures fonctionnelles des coléoptères.

On notera que les différents Ordres sont essentiellement déterminés en fonction de la structure des ailes et des pièces buccales.

# Reproduction et développement des insectes

La majorité des insectes est ovipare, les œufs étant généralement fécondés avant d'être déposés ; pour beaucoup d'espèces, la femelle dépose des œufs non fécondés : c'est la parthénogenèse.

Compte tenu de l'extraordinaire diversité des espèces (1 million ont été décrites et on pense qu'il en reste au moins 1 million à décrire) on ne s'étonnera pas de trouver aussi des insectes vivipares et ovovivipares.

- Le développement embryonnaire va de l'œuf à l'éclosion de la larve.
   Suivent les transformations morphologiques profondes que sont les métamorphoses.
- Les insectes dits "holométaboles" sont à métamorphose complète. On aura la succession œuf, larve, nymphe (encore appelée pulpe), et imago.
- Les insectes dits "hémimétaboles" sont à métamorphose incomplète, le stade nymphe n'existant pas.

On fera 3 remarques explicatives:

- La larve est souvent une chenille subissant au cours de sa croissance des mues successives.
- La nymphe : à ce stade du développement, les organes de la locomotion ne fonctionnent pas.

Elle est souvent entourée d'une enveloppe protectrice, le cocon. On distingue 2 types de nymphes :

- La chrysalide, nymphe aux ailes et aux pattes dissimulées dans un cocon genre momie (cas des papillons).
- La nymphe libre dont les futures pat-

- tes, antennes et ailes sont libres mais comme paralysées (cas des abeilles).
- L'imago : c'est le terme attribué en entomologie à l'insecte adulte ; lorsque l'imago sort de la pulpe, l'insecte définitif est formé : il ne lui reste plus éventuellement qu'à grandir, comme tout être vivant jeune.

# Observations entomologiques

Les habitudes, les différents travaux réalisés par les insectes, ne sont certainement pas le fruit d'une intelligence mais le résultat d'un instinct devant lequel l'Homme ne peut qu'être admiratif. Ce comportement animal mérite d'être étayé de quelques exemples donnés à titre indicatif.

- Les guêpes fabriquent à partir du bois un "papier" très solide servant de matériau de construction pour leurs nids.
- Coléoptères et larves diverses maîtrisent la technique du percement de tunnels, même dans un bois très dur.
- Les insectes sont d'excellents constructeurs, fabriquant et utilisant une remarquable variété de matériaux de construction.
- J.-H. Fabre souligne la structure et la nature remarquables du nid de la mante religieuse : maintenu à l'air libre tout l'hiver, il doit isoler et protéger de la pluie et du gel intense toute la descendance ; la substance dont est faite ce nid est l'une des plus adiabatiques connues. On trouve ici l'une des plus belles applications de la physique, du moins en ce qui concerne l'isolement thermique.
- Les insectes endorment et paralysent leurs proies d'une manière si parfaite qu'elles restent fraîches des jours, voire des semaines entières. Dans "Les Souvenirs Entomo-logiques" Fabre a décrit le procédé employé pour aboutir à la perfection du résultat.
- Certains insectes sont capables de luire, transformant l'énergie chimique en lumière froide, par un procédé chimique complexe.

# Conclusion

Nous espérons que ce survol rapide incitera le lecteur curieux à approfondir par lui-même certains aspects de l'univers des insectes, qui ne représente qu'une petite partie du phénomène général de la Vie. La bibliographie indiquée ci-contre l'aidera dans cette approche.

# **Bibliographie**

- Guide des Insectes (J. Zahraduik éditions Hatier)
- Fabre : l'homme qui aimait les insectes (Yves Delange éditions Lattès)
- J.H. Fabre : Souvenirs Entomologiques

# **Micropolis**



Situé à 20 km au nord de Millau, Micropolis fait face au village de Saint-Léons où naquit Jean-Henri Fabre en 1823. Un itinéraire de 14 salles thématiques permet une rencontre magique avec le monde des Insectes. On retiendra tout particulièrement :

- une salle où sont présentés, de façon attractive, les caractères morphologiques fondamentaux des insectes en comparaison avec la morphologie humaine.
- vivariums : plusieurs dizaines d'espèces sont dans leur milieu naturel, au sein d'une remarquable salle voûtée en terre crue. on peut ainsi observer les espaces où se reproduisent et grandissent les insectes.
- un bel espace vitré donne le spectacle de beaux papillons tropicaux vivant dans leur milieu naturel.
- une salle de cinéma recrée l'atmosphère du film Microcosmos auquel elle rend hommage ;
- une mare riche en insectes aquatiques a été aménagée à l'entrée du site. On peut y voir les espèces de la région (dytique, notonecte...)

Un espace multimédia, avec jeux interactifs, ainsi qu'une boutique aux nombreux articles permettent de prolonger une agréable visite.



## Jean-Henri Fabre

Entomologiste célèbre, Jean-Henri Fabre naît en décembre 1823 à Saint-Léons en Lévezou (Aveyron). Issu d'un milieu pauvre mais doté d'une intelligence très vive, il est nommé instituteur à Carpentras après avoir été recu à l'Ecole Normale de Rodez.

Poursuivant ses études en autodidacte, il obtiendra les licences de mathématiques et physique en 1847 et 1848. Sa vocation pour les sciences naturelles s'affirmera en Corse où il est professeur de physique. C'est plus tard, à Orange, que Fabre écrit et publie le premier volume de ses fameux "Souvenirs Entomologiques". 9 autres tomes suivront entre 1880 et 1890. Excellent mycologue doublé d'un peintre de talent, il laissera 700 aquarelles représentant les champignons de Provence. Il s'éteint en octobre 1915 à l'âge de 92 ans. En 1913, le Président de la République, Raymond Poincaré, se rend dans sa propriété personnelle, à Sérignan, pour lui exprimer la reconnaissance de la Nation.

"Pour bien faire comprendre la vie des insectes et des plantes, il faudrait créer une cité des insectes".

Jean-Henri Fabre

# Activités

# Voyage à St. Léons (Aveyron) à Micropolis,

la Cité des Insectes\* (Suite du N° 58 d'Auvergne-Sciences)

# par Pierrette TOURREIX

Nous remercions Micropolis aui nous a aimablement autorisés à utiliser les documents dont l'article ci-après est extrait et qui illustre ce que le groupe des « Jeunes Pousses » de l'ADASTA a découvert au cours de notre visite. Crédit à Gilles Tordieman.

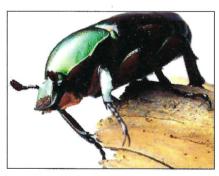


Micropolis, la Cité des insectes, est érigée sur les terres de Jean-Henri Fabre. en plein cœur de

l'Aveyron, matérialisant son rêve le plus cher : ouvrir aux visiteurs la perception de ces êtres multiples, divers et étranges, que sont les insectes.

Sous un éclairage tamisé, avec le chant des grillons pour musique de fond, on quitte alors le monde des humains, pour pénétrer dans un autre univers, une autre facon de vivre.

Micropolis, la Cité des insectes est un merveilleux voyage au pays de l'infiniment petit, à la rencontre du « petit peuple de l'herbe ». Tous les





thèmes y sont abordés : des exploits des insectes dans la nature à leurs méfaits, de leurs mœurs en société à leur vie amoureuse, de leur incidence sur l'agriculture à leur relation avec la santé de l'homme etc. L'utilisation des technologies les plus sophistiquées (vidéos. machineries, caméras endoscopiques) permet à chacun d'observer à son gré le comportement des insectes dans leur milieu naturel et de participer à d'étonnantes expériences mettant en présence l'homme, l'insecte et la plante.

Un itinéraire de 14 salles thématiques permet une rencontre magique avec le monde des Insectes. On retiendra tout particulièrement :

#### Des hublots pour découvrir les élevages

Tous les jours et toute l'année, des éleveurs s'occupent de ces petites bêtes... les salles d'élevage des insectes sont désormais visibles au travers de hublots. Le visiteur peut ainsi observer les espaces où se reproduisent et grandissent les insectes, futurs acteurs de Micropolis. Toute l'année les enfants peuvent profiter de visites guidées, d'ateliers pédagogiques pour approcher d'une manière ludique l'entomologie; ceci est dans le respect de l'idée de Jean Henri Fabre qui a lui-même laissé de nombreux ouvrages scolaires destinés à intéresser les enfants à cette science de l'entomologie.

Sur tout le parcours de visite, un réel effort pédagogique et ludique a été réalisé à l'intention des plus jeunes. Une série d'exercices interactifs place les enfants en situation de recherche et de découverte permanente. L'intérêt des enfants est sans cesse renouvelé. Les ateliers de groupe sont adaptés en fonction de l'âge des enfants et de la connaissance du monde des insectes par le groupe.

#### Micropolis c'est aussi des innovations permanentes: un vrai travail de fourmi!:

2001 Micropolis fête son premier printemps, en consacrant de plus en plus de place au vivant avec notamment la création d'une ruche géante et d'une mare aux insectes.

2002 Nouvel envol vers des contrées inconnues : Micropolis expérimente une nouvelle animation en se lançant dans «l'exploration sensorielle» avec 2 nouvelles salles, «Sensations» et «Plongée dans l'herbe», qui placent tous nos sens en éveil.

2003 Brillant de mille feux, Micropolis redouble d'inventivité pour toujours étonner, surprendre, amuser, émerveiller ses visiteurs. C'est ainsi que sont créées les premières visites guidées, balades nature et ateliers pédagogiques.

## Les nouveautés 2004

Exploration intérieure : la découverte des 5 sens : Que ressentent les insectes ? Ontils 5 sens comme nous? Micropolis nous invite en 2004 à percevoir le monde à travers les sens d'un insecte : un véritable voyage introspectif, aussi déroutant que passionnant, à la recherche de sensations inédites, différentes expériences mettant en éveil tous les sens du visiteuru la vue, l'ouïe, le toucher, le goût, l'odorat, pour découvrir ce que ressentent les insectes, et par là même, mieux comprendre leur rôle dans l'écosystème.

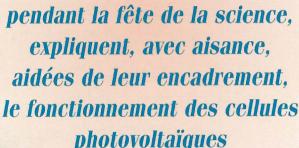
#### A l'extérieur : les Pavillons de la Cité

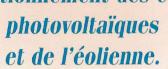
Un gigantesque Carnaval des insectes attend le visiteur, de pavillon en pavillon, sur un itinéraire en boucle où des insectes géants l'inviteront à se donner en spectacle en leur compagnie pour le plus grand plaisir des petits et des grands. Au total, un vaste parcours de découverte de 2 heures. A noter que Micropolis organise dans le cours de l'année diverses manifestations autour des thèmes des insectes et des plantes.

# Fête de la Science au Centre Jaude



Les jeunes pousses de l'ADASTA, en blouses blanches au centre Jaude











## Adhésions et Abonnements

L'adhésion donne droit à la revue Auvergne-Sciences, à des réductions sur les locations et les achats, à des invitations aux conférences et aux visites d'entreprises (une participation aux frais peut être demandée lors de certaines visites).

Permanences - elles sont assurées par les bénévoles :

du Lundi au Jeudi de 8h à 12h et de 14h à 17h et le Vendredi de 8h à 12h *(juillet et août inclus)* En cas d'absence laisser message sur répondeur ou envoyer fax ou E-mail.

Adressez le courrier à

ADASTA, Centre Riche-Lieu - 13, rue Richelieu - 63400 Chamalières Tél. 04 73 92 12 24 - Fax 04 73 92 11 04 - E-mail : adaşta@wanadoo.fr Site internet : http://perso.wanadoo.fr/adasta

Dépôt légal novembre 2004 - N° ISSN - 1166-5904